



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Estudio de la micorriza arbuscular en el cultivo de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) en condiciones de invernadero



TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

EDUARDO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de:

Dr. ALEJANDRO CORONA AMBRIZ



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**

Chapingo, Estado de México, noviembre de 2024

**ESTUDIO DE LA MICORRIZA ARBUSCULAR EN EL CULTIVO DE CAPULÍN
(*Prunus serotina* Ehrh.) EN CONDICIONES DE INVERNADERO**

Tesis realizada por **EDUARDO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor Indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



Dr. ALEJANDRO CORONA AMBRIZ

ASESOR:



Dra. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

ASESOR:



Dra. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA

ASESOR:



Dr. LEOPOLDO MOHEDANO CABALLERO

CONTENIDO

CONTENIDO	ii
DEDICATORIAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Problema de investigación	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo general	4
1.5.2 Objetivos particulares	4
1.6 Preguntas de investigación	4
1.7 Hipótesis	5
1.8 Contenido capitular del documento de titulación	5
1.9 Estructura capitular del documento de titulación	6
1.10 Literatura citada	7
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Marco conceptual	9
2.1.1 Género Prunus	9
2.1.2 Capulín (Prunus serotina Ehrh.)	9
2.1.3 Características botánicas	10
2.1.4 Cultivo de capulín en México	11
2.1.5 Problemática del cultivo	11
2.1.6 Interacciones simbióticas	12
2.1.7 Micorriza	12

2.1.8 Tipos de micorriza	13
2.1.9 Simbiosis de la micorriza.....	14
2.1.10 Importancia de las micorrizas.....	15
2.1.11 Micorriza arbuscular	15
2.2 Marco de Referencia	16
2.2.1 Impacto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento y desarrollo de plantas de género <i>Prunus</i> estudios internaciones	16
2.2.2 Aplicación de micorrizas arbusculares para optimizar el crecimiento y desarrollo de plantas del género <i>Prunus</i> en México	18
2.3 Literatura citada	20
CAPÍTULO III. Métodos de escarificación para mejorar la germinación de semillas de capulín (<i>Prunus serotina</i>): Un análisis longitudinal y transversal*	26
CAPÍTULO IV. Impacto de la simbiosis micorrízica arbuscular en el desarrollo de capulín (<i>Prunus serotina</i> Ehrh.) en condiciones controladas ¹	42
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contenido y estructura de la tesis	6
--	---

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del árbol de capulín	10
---	----

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Figura 1. Zona de estudio.....	30
Figura 2. Comportamiento longitudinal de los tratamientos: remojo/secado sin endocarpio (B) y ácido clorhídrico sin endocarpio (D). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$	35
Figura 3. Comportamiento longitudinal de los tratamientos: remojo/secado con endocarpio (A) y testigo sin endocarpio (F). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$	37
Figura 4. Comparación longitudinal de los tratamientos: Testigo con endocarpio (E) y ácido clorhídrico con endocarpio (C). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de, $\alpha=0.05$	38
Figura 5. Comportamiento del porcentaje de germinación acumulado en el tiempo.	39
Figura 6. Porcentaje de germinación en la segunda (izquierda) y tercera (derecha) semana. Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tratamientos con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$	41

Figura 7. Porcentaje de germinación en la cuarta (izquierda) y quinta (derecha) semana. Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de tratamientos con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ 42

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 4

Figura 1. Zona de estudio y puntos de muestreo, realizados en Ocotepéc, Puebla. 47

Figura 2. Tinción de raíces de capulín. a) almacenamiento en solución FAA. b) soluciones para la tinción: 1. peróxido de sodio, 2. ácido clorhídrico al 10%, 3. azul de tripano 0.05% y 4. ácido láctico. c) laminas con fragmento de raíz teñidos 48

Figura 3. Filtrado de esporas y cuantificación. 49

Figura 4. Inoculación y trasplante de plántulas de capulín. 50

Figura 5. Biomasa fresca y Biomasa seca de plantas de capulín. 52

Figura 6. Identificación de estructuras micorrízicas en árboles de capulín a) hifas y vesículas, b) espora con hifa conectada y c) estrato..... 54

Figura 7. Evaluación micorrízica en arboles de capulín, a) colonización micorrízica en raíces y b) cantidad de esporas en suelo. 55

Figura 8. Altura de plantas de capulín. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas, $\alpha=0.05$ 56

Figura 9. a) diámetro del cuello de la raíz y b) número de hojas. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas $\alpha=0.05$ 56

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Métodos de escarificación: Tratamientos..... 30

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas del porcentaje de germinación..... 34

Cuadro 3. Estimadores de los parámetros del modelo logístico para cada tratamiento.	39
--	----

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Contenido de los inóculos comerciales.....	49
Cuadro 2. Efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en plantas de capulín.....	57
Cuadro 3. Valores promedio de plantas de capulín sujetas a las condiciones de invernadero.	59
Cuadro 4. Análisis nutrimental foliar en plantas de capulín.	60

DEDICATORIAS

A mis padres, Alfredo González y Amelia Hernández, les dedicó este logro con profundo agradecimiento. Siempre confiaron en mi capacidad y perseverancia. Su apoyo emocional en todo momento ha sido mi apoyo más grande, y mi inspiración para cumplir todos mis objetivos.

A mi hermana Gaby, que siempre fuiste un ejemplo a seguir, por tu apoyo incondicional, a todos esos consejos que me motivaron a seguir adelante, sirviéndome como motivación aun en los momentos complicados, enseñándome a no rendirme y demostrar que se puede.

A mí novia Iveth, que siempre estuviste alentándome en todo momento, aun en los momentos complicados siempre estuviste para sacarme una sonrisa y seguir adelante, por tus consejos, por tu escucha y por tus porras hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico para continuar con los estudios de posgrado y a la realización de mi investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis estudios de maestría y aportarme las herramientas necesarias en cada paso.

A la División de Ciencias Forestales por permitirme el uso de sus instalaciones y el apoyo de su personal académico y administrativo.

Al mi director de tesis el Dr. Alejandro Corona Ambriz por su amistad, sus consejos, experiencia, disposición y apoyo incondicional durante la elaboración de esta investigación.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por su amistad, entusiasmo, dedicación, su dedicación y consejos que me facilitaron en gran medida la realización de esta investigación.

A la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa por su apoyo incondicional, consejos que facilitaron la culminación de este trabajo.

Al Dr. Leopoldo Mohedano Caballero por su amistad, por sus valiosos consejos para facilitar el trabajo de investigación, y por su orientación de manera paciente.

A la laboratorista Irais Johanna Espinosa Domínguez, por tu amistad, tus enseñanzas, paciencia, disposición, por tus consejos y apoyo en los momentos de complicación en la elaboración de la investigación.

A las personas de municipio de Ocotepéc, Puebla, por permitirme en todo momento la toma de muestras en sus predios, con el fin de realizar mi investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Eduardo González Hernández

Fecha de nacimiento: 05 de diciembre de 1995

Lugar de nacimiento: Ciudad de México, CDMX.

No. Cartilla militar: D-2967349

CURP: GOHE951205HDFNRD02

Profesión: Ing. Agrónomo

Cédula profesional: 12746965



Desarrollo académico

Bachillerato:	2010-2013	Colegio de Bachilleres Tecnológico No.2 Dr. Maximiliano Ruíz C.
Licenciatura:	2014-2018	Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco.

RESUMEN GENERAL

ESTUDIO DE LA MICORRIZA ARBUSCULAR EN EL CULTIVO DE CAPULÍN (*PRUNUS SEROTINA* EHRH.) EN CONDICIONES DE INVERNADERO¹

Las micorrizas arbusculares son asociaciones simbióticas, mutualistas entre las raíces de las plantas y algunos hongos del suelo, que mejoran el desarrollo vegetal y la productividad de especies como el capulín que tiene grandes retos en cuanto a su propagación, ya que el endocarpio retarda e inhibe, en gran medida, la germinación de las semillas. Además, el establecimiento de las plantas en campo se ve afectado por las condiciones abióticas y bióticas, provocando su muerte en muchas ocasiones. Actualmente, el uso de micorrizas permite afrontar dicha problemática. El objetivo del presente trabajo fue evaluar y comparar los efectos de los inóculos comerciales de micorrizas arbusculares y un fertilizante químico en el crecimiento y desarrollo de plántulas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) cultivadas en invernadero. Después de 30 días de la inoculación, se evaluaron las variables: altura de planta, diámetro del cuello de la raíz, número de hojas, porcentaje de colonización micorrízica y cantidad de esporas y se determinaron los índices de calidad de planta: índice de esbeltez, lignificación, relación aérea/biomasa radical e índice de Dickson. Finalmente, se determinó la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en las hojas de las plantas. Las plantas inoculadas presentaron diferencias significativas con respecto a la fertilización química; es decir, su crecimiento y desarrollo fue superior. El porcentaje de colonización micorrízica para ambos inóculos fue de aproximadamente 50% de las raíces y la cantidad de esporas aumento a través del tiempo. Los índices de calidad revelaron que las plantas inoculadas presentaron una calidad superior en comparación con las tratadas con fertilizante químico. Se concluye que, la inoculación con micorrizas arbusculares mejoran significativamente el crecimiento y desarrollo de las plántulas de capulín, así como la absorción de NPK, lo que representa una ventaja considerable frente al uso de fertilizantes químicos.

Palabras clave: Colonización, esporas, calidad de planta, macronutrientes, crecimiento y desarrollo.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Eduardo González Hernández

Director de Tesis: Dr. Alejandro Corona Ambriz

ABSTRACT

Study of arbuscular mycorrhiza in capulín cultivation (*Prunus serotina* ehrh.) under greenhouse conditions¹

Arbuscular mycorrhizas are symbiotic, mutualistic associations between plant roots and certain soil fungi. They enhance plant growth and productivity, particularly in species like capulín, which face significant propagation challenges due to the endocarp significantly delaying and inhibiting seed germination. Moreover, the establishment of plants in the field is influenced by both abiotic and biotic factors, often resulting in their death. Currently, the use of mycorrhizal fungi provides a solution to this problem. The objective of this study was to evaluate and compare the effects of two commercial arbuscular mycorrhizal inocula and a chemical fertilizer on the growth and development of capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) seedlings cultivated in a greenhouse. Thirty days after inoculation, the following variables were assessed: plant height, root neck diameter, leaf number, mycorrhizal colonization percentage, and spore count. Additionally, plant quality indices were determined: stem quality, lignification, aboveground biomass/roots biomass ratio, and the Dickson quality index. Finally, the concentrations of nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK) in the plant leaves were measured. The inoculated plants exhibited significantly better growth and development compared to those fertilized chemically. The mycorrhizal colonization rate for both inocula was around 50% of the roots, and the spore count increased over time. The quality indices indicated that the inoculated seedlings displayed superior quality compared to those treated with chemical fertilizer. It is concluded that inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi significantly enhances the growth and development of capulín seedlings, as well as their NPK absorption, providing a significant advantage over the use of chemical fertilizers.

Keywords: colonization, spores, plant quality, macronutrients, growth and development.

¹Master's Thesis in Forest Sciences, Chapingo Autonomous University

Author: Eduardo González Hernández

Thesis Advisor: Dr. Alejandro Corona Ambríz

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

Los estudios del uso de biofertilizantes sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de capulín son muy escasos; generalmente, para mejorar estos atributos se recurre a la aplicación de fertilizantes químicos que ayudan a alcanzar dichos rasgos, sin embargo, estos fertilizantes raramente son aplicados en proporciones adecuadas (Maheshwari et al., 2023), lo que termina desencadenando una serie de daños a la calidad del suelo, el agua, el aire y en la salud de las personas (Balmford et al., 2018). En consecuencia, el uso de biofertilizantes, como los inóculos micorrízicos han generado un atractivo en los últimos años debido a la amplia variedad de beneficios que pueden ofrecer, tanto a las plantas como al ecosistema agrícola en general.

Por ello, los inóculos micorrízicos se pueden definir como insumos bio-formulados principalmente por esporas fúngicas, fragmentos de raíces e hifas, que se encuentran en soportes sólidos, líquidos o en gel (Mishra, 2016), los cuales suelen ser aplicados de manera foliar, en riego o al suelo (Santoyo et al., 2019). Esta inoculación proporciona una estrategia sostenible para restaurar la calidad del suelo y fomentar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Gujre et al., 2021).

Entre las investigaciones sobre la inoculación de micorrizas arbusculares en plantas de capulín, se encuentran un número limitado, anteriores a los años 90, destacando autores como Jean y Ferrera-Cerrato (1989), los cuales registraron que la aplicación de micorrizas arbusculares del género *Glomus* mostro efectos positivos en el crecimiento de plantas de capulín en comparación con plantas no inoculadas. De manera similar, Gómez-Cruz y Ferrera-Cerrato (1990) reportaron que plantas de capulín inoculadas en suelo erosionado, mostraron una mayor altura que plantas no inoculadas.

Si bien los estudios resultan ser antiguos, esto no significa que no haya investigaciones recientes, sin embargo, la gran mayoría de éstos no se centran en evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas de capulín, sino más bien se enfocan en evaluar los beneficios de la inoculación micorrízica en plantas del género *Prunus*.

Dentro de las investigaciones más recientes que utilizan la inoculación micorrízica en plantas del género *Prunus*, destaca lo realizado por Liang et al. (2023), que evaluaron el efecto de diferentes inóculos micorrízicos en respuesta al crecimiento fisiológico bajo condiciones de inundación del suelo en *Prunus persica*. Zai et al. (2021) estudiaron los efectos de la inoculación en el crecimiento y la absorción de nutrientes en condiciones salinas en *Prunus marítima*. Por último, Bi et al. (2021) emplearon la simbiosis micorrízica para facilitar el crecimiento y la fotosíntesis en plántulas de *Prunus sibirica* L.

1.2 Justificación

El árbol de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) es una especie nativa de México que ha sido utilizada desde épocas prehispánicas (Fresnedo et al., 2011), apreciado no solo por su característico fruto, sino también por su gran follaje, que actúa como una barrera rompevientos natural; sin embargo, poco se conoce sobre su capacidad para restaurar suelos erosionados. Esta especie puede encontrarse en diversos entornos, desde bosques, parcelas agrícolas hasta los traspacios de viviendas, por ello es considerado un árbol de gran potencial agroforestal y como una especie multipropósito (Guzmán et al., 2020).

A pesar de su gran valor, el capulín ha experimentado una notable disminución en la población de árboles, así como en su reproducción y su preservación; sumado a que su principal atributo, el fruto, ha disminuido su presencia en los mercados, por ende, su consumo ha disminuido drásticamente. Esta situación se deriva de la escasa divulgación de información actualizada sobre sus propiedades, así como un desinterés por las personas de mantener su cultivo (Páez-Reyes et al., 2013); además, el manejo inadecuado, la urbanización de comunidades, el bajo porcentaje de germinación de su semilla y su reducida tasa de supervivencia en estado juvenil, ha provocado una disminución significativa de su presencia en áreas donde era común verlos.

Aunado a lo anterior, son casi nulas las investigaciones enfocadas en solucionar las problemáticas presentes en el árbol de capulín, es por ello que la implementación de técnicas de mejoramiento en su crecimiento, rendimiento y desarrollo son indispensables. Una estrategia efectiva propuesta es la inoculación de micorrizas arbusculares, las cuales

mejoran la captación de agua y nutrientes, incrementa la resistencia a estreses climáticos y mejora la calidad del fruto (Páez-Reyes et al., 2013). Por ello, un primer acercamiento para comprender la funcionalidad de los inóculos micorrizicos se encuentra en los trabajos de autores como Carrillo-Saucedo et al. (2022) y Lozano et al. (2015).

Finalmente, es importante mencionar que, esta investigación propone desarrollar técnicas de mejoramiento utilizando biofertilizantes, buscando promover un enfoque respetuoso con el medio ambiente, sustituyendo la necesidad de implementar productos químicos; además, de fomentar el interés en el cultivo del capulín, motivando a las personas a preservar dicha especie.

1.3 Planteamiento del problema

Es indispensable generar información que analice la efectividad de la inoculación micorrízica en especies agroforestales en México, entre la que se encuentra el árbol de capulín (*Prunus serotina* Ehrh), esto como una alternativa prometedora para mejorar la absorción de nutrientes, el crecimiento natural, y la adaptabilidad a factores bióticos y abióticos, esto mediante su estudio, buscando ampliar la divulgación sobre los beneficios de este biofertilizante, así como la información para facilitar su implementación en prácticas de reproducción y manejo agroforestal de otras especies de interés.

1.4 Problema de investigación

Una de las preguntas clave de esta investigación es si el uso de inoculantes micorrízicos proporciona los mismos beneficios en el crecimiento y desarrollo de plantas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh) en comparación con los fertilizantes químicos.

Si bien los biofertilizantes, como las micorrizas, hoy en día son desconocidos por muchas personas, su capacidad para aportar beneficios a diversas especies agroforestales es significativa, por lo cual es necesario evaluar su desempeño mediante variables indicadoras del crecimiento y desarrollo de plantas, los cuales proporcionan una visión más completa sobre el potencial de los inoculantes micorrízicos en comparación con los benéficos que ofrece la fertilización química.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar los efectos en el crecimiento y desarrollo en plantas de (*Prunus serotina* Ehrh.) inoculadas con micorriza arbuscular y fertilizadas químicamente en condiciones de invernadero.

1.5.2 Objetivos particulares

- Evaluar y comparar el crecimiento y desarrollo obtenido en las plantas inoculadas contra plantas de la misma especie, tratadas con un fertilizante químico.
- Evaluar el efecto de métodos de escarificación para incrementar el porcentaje de germinación en semillas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) en condiciones de invernadero.
- Realizar un análisis foliar para determinar el contenido de los nutrientes absorbidos por las plantas en cada tratamiento.
- Identificar, a partir de un muestreo de suelo, la posible presencia de micorrizas en arboles de *Prunus serotina* Ehrh. establecidos en campo.

1.6 Preguntas de investigación

Las preguntas que surgen a partir del problema de investigación son las siguientes:

¿Existen diferencias significativas en el crecimiento y desarrollo entre plantas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh) inoculadas con micorrizas arbusculares y plantas con y sin fertilizante químico, bajo condiciones de invernadero?

¿Qué método de escarificación (físico o químico) resulta más efectivo para incrementar el porcentaje de germinación de semillas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh) en condiciones de invernadero?

¿Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la inoculación micorrízica puede ser un biofertilizante equiparable a los beneficios que aporta la fertilización química?

1.7 Hipótesis

El uso de micorrizas arbusculares como un inoculante aplicado en plantas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.), no aumentara significativamente su altura, diámetro del tallo y número de hojas en comparación con plantas de la misma especie tratadas con y sin fertilizante químico.

La aplicación de escarificación física en semillas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) no aumentará significativamente el porcentaje de germinación en comparación con semillas sometida a métodos de escarificación química y con semillas no escarificadas.

1.8 Contenido capitular del documento de titulación

El documento de titulación incluye el siguiente contenido: una portada, hoja de aprobación del comité asesor, tabla de contenido, lista de cuadros, lista de figuras, dedicatoria, agradecimientos, datos biográficos del autor, resumen general y abstract. Posteriormente, se complementa con el **capítulo uno** que corresponde a la *Introducción general* donde se describe la importancia del problema investigado, algunos antecedentes, la justificación, objetivos e hipótesis del estudio. En el **capítulo dos**, se aborda la *Revisión de literatura* sobre el estado de conocimiento del problema de estudio. El **capítulo tres y cuatro** presenta los resultados de la investigación en formato de *Artículo científico* y por último se presenta las conclusiones generadas de la investigación.

1.9 Estructura capitular del documento de titulación

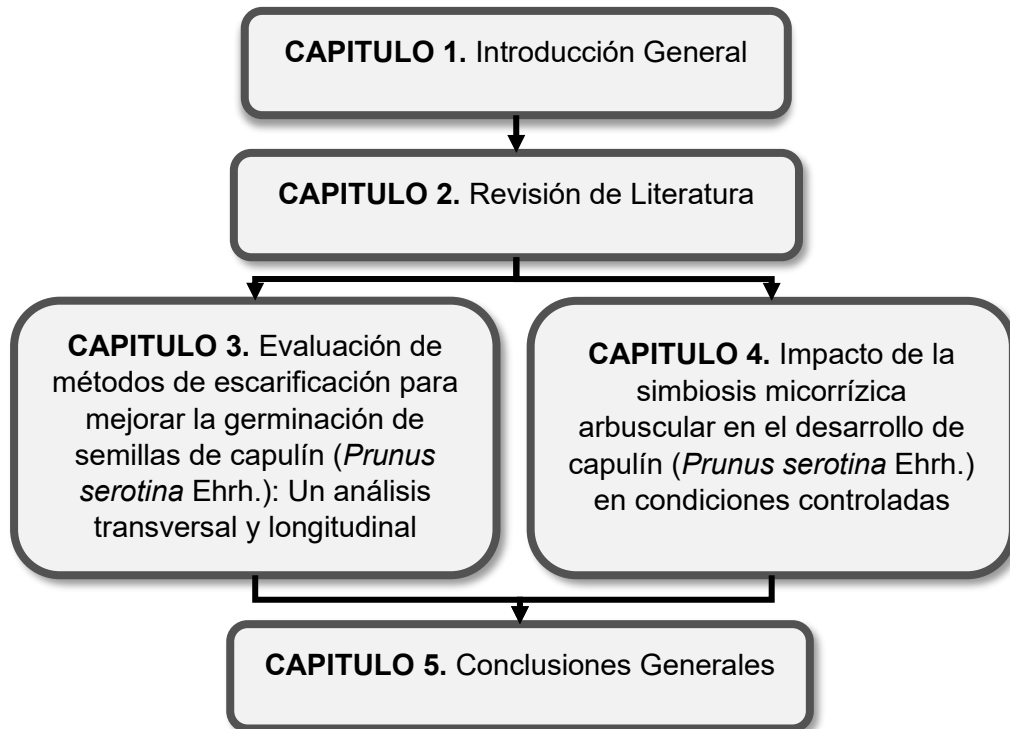


Figura 1. Contenido y estructura de la tesis

1.10 Literatura citada

- Balmford, A., Amano, T., Bartlett, H. et al. (2018). The environmental costs and benefits of high-yield farming. *Nat Sustain* 1, 477-485. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0138-5>
- Bi, Y., Xie, L., Wang, Z. et al. (2021). Arbuscular mycorrhizal symbiosis facilitates apricot seedling (*Prunus sibirica* L.) growth and photosynthesis in northwest China. *Int J Coal Sci Technol* 8, 473–482. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00408-6>
- Carrillo-Saucedo, S. M., J. Puente-Rivera, S. Montes-Recinas y R. Cruz-Ortega. 2022. Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana* 129: e1932. <http://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Fresnedo R. J., Segura S., & Muratalla-Lúa A. (2011). Morphovariability of capulín (*Prunus serótina* Ehrh.) in central-western region of Mexico from a plant genetic resources perspective. *Genet Resour Crop Evol*, 58 (4): 481-495. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9592-2>
- Gómez-Cruz, G. y R. Ferrera-Cerrato. (1990). *Prunus serotina* spp. (capulí cav. Mc. Vaugh) y la micorriza VA en tepetate amarillo del estado de México. Resúmenes de V Congreso Latinoamericano de Botánica. Habana, Cuba. p. 10.
- Gujre, N., Agnihotri, R., Rangan, L., Sharma, M. P., Mitra, S. (2021). Deciphering the dynamics of glomalin and heavy metals in soils contaminated with hazardous municipal solid wastes. *Journal Of Hazardous Materials*, 416, 125869. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125869>
- Guzmán, F. A., Segura-Ledesma, S. D., & Almaguer-Vargas, G. (2020). El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(1), 2611866. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611866>
- Jaen, C. D. y R. Ferrera-Cerrato. (1989). Aplicación de los hongos endomicorrizicos en la producción de capulín (*Prunus serotina* var. Capulí). In: Memorias del XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Montecillo, México. p. 154.
- Liang, S., Zou, Y., B., & Wu, Q. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic fungi differentially modulate polyamines or proline of peach in response to soil flooding. *Pedosphere*, 34(2), 460-472. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.05.002>
- Lozano Sánchez, Juan David, Armbrrecht, Inge, & Montoya Lerma, James. (2015). Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agronómica*, 64(4), 289-296. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.46045>
- Maheshwari, D.K., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Dheeman, S. (2023). Effect of Microbial Consortium Vs. Perfected Chemical Fertilizers for Sustainable Crop Growth. *Microorganisms for Sustainability*, vol 43. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9570-5_14

- Mishra, J., & Arora, N. K. (2016). Bioformulations for plant growth promotion and combating phytopathogens: a sustainable approach. *Bioformulations: for Sustainable Agriculture*, 3-33. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_1
- Páez-Reyes, L., Sánchez-Olarte, J., Velasco-Torres, M., Álvarez-Gaxiona, J., & Argumendo-Macías, A. (2013). Propuesta de estrategia para el mejoramiento del cultivo de capulín en los municipios de Domingo Arenas, Calpan y San Nicolás de los Ranchos. *Revista Ra Ximhai* 9(1), 109-119. <https://raximhai.uaim.edu.mx/index.php/rx/article/view/751>
- Santoyo, G.; Sanchez-Yañez, J. & De los Santos-Villalobos, S. (2019). Methods for detecting biocontrol and plant growth-promoting traits in Rhizobacteria. Mexico. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5767-1-8>
- Zai, X. M., Fan, J. J., Hao, Z. P., Liu, X. M., & Zhang, W. X. (2021). Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing fungi on nutrient uptake and photosynthesis of beach palm under salt stress environment. *Scientific reports*, 11(1), 5761. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84284-9>

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Género *Prunus*

El género *Prunus* forma parte de la familia de las Rosaceae, es un género que comprende aproximadamente 200 especies de árboles y arbustos ampliamente distribuidos, los cuales, incluye muchos de los cultivos frutales más importantes desde el punto de vista económico, así como especies cultivadas como ornamentales y otras como arboles madereros y con fines medicinales (Potter, 2011).

Una característica que distingue a los árboles frutales del género *Prunus* es su fruto, el cual es una drupa; este consiste en un fruto con mesocarpio carnoso, un endocarpio leñoso o duro, y generalmente con una sola semilla (Mabberley, 2017).

En este género se pueden encontrar un gran número de especies muy apreciadas, entre las que se encuentran diferentes árboles frutales de consumo masivo, como las almendras (*Prunus dulcis*), las cerezas (*Prunus avium*), los melocotones (*Prunus persica*), la ciruela (*Prunus domestica*), el capulín (*Prunus serotina*), y entre muchas otras (García-Flores et al., 2020). Del mismo modo, también cuentan con especies ornamentales como el ciruelo de jardín (*Prunus cerasifera*) y el ciruelo japon (*Prunus pisardi*); cabe señalar que en México existen frutales nativos del género *Prunus* que han sido seleccionado, consumidos y cultivados desde tiempos prehispánicos (Rzedowski, 2021).

En los últimos años, este género sea extendido por gran parte del mundo con una superficie total en torno a los 32 millones de ha. La producción de estos frutales de hueso en 2013 rondo a los 43 millones de toneladas, destacando la producción de durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch) (Martínez-Gómez, 2017).

2.1.2 Capulín (*Prunus serotina* Ehrh.)

El árbol de capulín tiene sus orígenes en Norteamérica, con distribución hacia los bosques orientales de los Estados Unidos, y extendiéndose hasta las regiones centrales

de México, por las Sierras Madre Oriental, Occidental y el Eje Neovolcánico (Blancas & Beltrán-Rodríguez, 2017; Téllez et al., 2020); cuyas bases de identificación taxonómica y distribución geográfica fueron propuestos por McVaugh (1951), incluyendo diversas subespecies. McVaugh afirmó la existencia de cinco subespecies (*capulí*, *eximia*, *hirsuta*, *serotina* y *virens*), sin embargo, en México se han realizado trabajos de identificación morfológica diferenciando tres subespecies presentes en el país (*capulí*, *serotina* y *virens*) (Fresnedo-Ramírez et al., 2011).

De acuerdo a McVaugh (1951) el árbol de capulín se clasifica taxonómicamente de la siguiente manera (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del árbol de capulín

Taxones	Clasificación
Reino	Plantae
División	Magnolophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Género	Prunus
Especie	<i>Prunus serotina</i>

2.1.3 Características botánicas

El capulín es un árbol de crecimiento monopódico y caducifolio, que alcanza una altura de 5 a 15 metros. Su copa es ancha de forma ovoide, lo que genera una sombra densa; las hojas son estipuladas, simples y alternas, con pecíolos cortos, teniendo una forma ovalada a lanceoladas de 5 a 16 cm de largo por 2 a 5 cm de ancho, haz verde oscuro y brillante. El tronco es largo y recto en el bosque, pero en los claros es corto y ancho. Su corteza tiene una tonalidad café o grisácea casi lisa exceptuando las ramas tiernas que a veces son pubescentes (CONABIO, 2012). Sus flores son hermafroditas, numerosas, de un tamaño reducido y de un color blanquecino, agrupadas en racimos de 10 a 15 cm. Su fruto es carnoso, pequeño, de color negro rojizo en la madurez de 12 a 20 mm, de sabor agridulce y astringente, conteniendo una sola semilla esférica y rodeada por un endocarpio duro (Páez-Reyes et al., 2013).

2.1.4 Cultivo de capulín en México

El cultivo del capulín puede encontrarse distribuido en diferentes regiones de México, este se cultiva a pequeñas escalas en una superficie de 6 mil hectáreas, distribuidas principalmente en los estados de Puebla, Veracruz, Guerrero, Estado de México, Morelos y Michoacán (Fresnedo-Ramírez et al., 2011).

Es un árbol apreciado principalmente por su fruto el cual es consumido en estado fresco, deshidratado o usado en la elaboración de productos comestibles, como mermeladas, atoles, licores, nieves, tamales, postres, en fermentaciones, y en conservas (Rodríguez & Farfán, 2014; Ramírez-Mandujano & Vargas-Campos, 2015). En algunos estados como Morelos, Hidalgo y Estado de México es usado como remedio casero para combatir la tos, la hipertensión, aliviar la diarrea y dolores abdominales (SADER, 2017; Blancas et al., 2023). Además, es la única especie de su género que proporciona madera para el comercio, en la ebanistería o como combustible (Guzmán et al., 2020).

En 2017 la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) reportó que en México se produjeron más de 227 toneladas de capulín, siendo los estados de México, Puebla y Veracruz los que encabezaron la lista y en conjunto aportaron el 87 por ciento de la producción. Sin embargo, para el 2018 esta cifra se vio reducida a 220 toneladas de fruta, agregando a la lista de productores al estado de Jalisco.

Si bien en los últimos años el árbol de capulín ha ido perdiendo presencia en las áreas donde solía ser común, este ha sido desplazado a zonas rurales, donde puede observarse a las orillas de los caminos y, principalmente, en los traspatios y en los terrenos agrícolas (Ramírez-Mandujano & Vargas-Campos, 2015), esto se debe específicamente a su frondoso follaje, ya que proporciona una barrera de protección natural para los cultivos principales; además, aunque desconocido para muchas personas, el capulín tiene la capacidad de rehabilitar suelos erosionados (Avendaño-Gómez et al., 2015).

2.1.5 Problemática del cultivo

En la actualidad, a pesar del gran potencial que presenta el cultivo del capulín, esta especie resulta poco atractiva para las personas; esto a la escasa información existente

sobre el uso y manejo en las comunidades rurales (López-Hernández et al., 2024), así como a la baja presencia de su fruto en los mercados, lo que genera un valor económico escaso (Páez-Reyes et al., 2013). Además, la tala desmedida de los árboles ha reducido considerablemente su población; sumando, a que la reproducción de esta especie resulta ser lenta, ya que su germinación tiene un porcentaje entre 50 a 85% (McVaugh, 1951), y en su etapa juvenil, enfrenta dificultades para establecerse en parcelas agrícolas.

Por otra parte, para tener una idea de los valores de producción del capulín, estos pueden compararse con otros cultivos del género *Prunus* como el caso del durazno que su producción en 2018 alcanzó las 158.8 mil toneladas (SIAP, 2019), la cereza tuvo una producción total de 155.70 mil toneladas (SADER, 2023), mientras que la ciruela llegó a un total de 72 mil toneladas (SADER, 2021), estos valores de producción demuestran ser más altos que los del capulín, reflejando así un desinterés por los productores de desarrollar dicho cultivo.

2.1.6 Interacciones simbióticas

Los microorganismos del suelo desempeñan papeles vitales en el ciclo de los nutrientes, como la descomposición de la materia orgánica, la estructura del suelo, la promoción de la salud de las plantas, y la simbiosis de raíces (Bastipati et al., 2024). Dichas relaciones simbióticas detallan esta interacción entre dos organismos de distinta especie biológica (Flores-Juárez et al., 2020). Las micorrizas son asociaciones mutualistas donde el hongo y la planta intercambian nutrientes necesarios para su supervivencia, de esta forma los hongos reciben carbono derivado de la fotosíntesis y la planta recibe nutrientes como fósforo y nitrógeno (Genre et al., 2020).

2.1.7 Micorriza

La palabra micorriza significa hongo-raíz, derivado de las palabras en griego “mykos” (hongo) y “rhiza” (raíz), siendo este término utilizado por primera vez para describir las asociaciones entre plantas terrestres y ciertos hongos del suelo, descritas por el patólogo Albert Bernard Frank en 1885 (Allen, 1991).

La clasificación actual reconoce siete tipos diferentes de micorrizas: ectomicorriza, micorriza arbuscular, ectoendomicorriza, micorriza arbutoide, micorriza ericoide, micorriza monotrofoide y micorriza orquidácea (Smith y Read, 2008), esta clasificación se basa en las estructuras internas e intercelulares que presentan; estos hongos crecen en la mayoría de los suelos y establecen relaciones simbióticas con el 90% de los ecosistemas agrícolas (Camarena-Gutiérrez, 2012).

Con base a la clasificación propuesta por Redecker et al. (2013) y por SchüBles y Walker (2010), actualizada en septiembre de 2018 en <http://www.amf-phylogeny.com/amphylotaxonomy.html>. Se describe al filo Glomeromycota como una sola clase que incluye cuatro órdenes: Glomerales, Diversisporales, Paraglomerales y Archaeosporales; 12 familias y 34 géneros, con aproximadamente 316 morfoespecies de hongos micorrícicos arbusculares.

Las plantas que participan en esta asociación obtienen diversos beneficios, lo que ejemplifica la relación de mutualismo (Camargo-Ricalde et al., 2012), en esta interacción, los hongos micorrizicos aportan protección a la planta contra patógenos y a condiciones climáticas adversas (Di Martino et al., 2019), mientras que los hongos adquieren carbohidratos para completar su ciclo de vida.

2.1.8 Tipos de micorriza

De acuerdo con la forma de penetración del hongo en la raíz, por las estructuras características que desarrollan, y las especies de hongos y de planta involucradas, las micorrizas se han agrupado en diferentes tipos (Camargo-Ricalde et al., 2012). Los cuales algunos de ellos son más conocidos que otros, estos son: ectomicorrizas, micorrizas arbusculares, micorriza ericoide y micorriza orquidoide:

- **Ectomicorrizas:** Son una relación mutualista entre hongos y plantas vasculares, el principal rasgo diferenciador es la presencia de tres elementos estructurales: 1) un velo o manto que cubre la superficie de la raíz; 2) red de hartig, una estructura similar a una telaraña; 3) micelio extra radical y sus formaciones de hifas (Nedelin Teodor, 2014).

- **Micorrizas arbusculares:** Se caracterizan por el desarrollo de hifas inter e intracelulares y estructuras de intercambio denominadas arbuscúlos dentro de las células corticales de la raíz y por la producción de esporas intra y extra radicales, además, algunas especies desarrollan vesículas dentro de las raíces (Emanuel et al., 2020).
- **Micorriza ericoide:** Las micorrizas ericoide comparten características con las ectomicorrizas al tiempo que hay penetración al interior de las células corticales por hifas septadas. Los hongos asociados son reconocidos como formadores de ectomicorrizas, lo cual se convierte en una asociación especial de simbiosis (Carrillo Sánchez, 2015).
- **Micorriza orquidoide:** También llamadas endomicorrizas estas tienen características donde el micelio invade la raíz e inicialmente es intercelular, pero luego penetra en el interior de las células radicales, desde la rizodermis hasta las células corticales (Carrillo Sánchez, 2015).

2.1.9 Simbiosis de la micorriza

La colonización de las raíces es precedida por el mutuo reconocimiento entre la planta y el hongo, a través de moléculas que se difunden en el suelo (Bonfante y Requena, 2011; Nadal y Paszkowski, 2013). Las esporas que se encuentran en los alrededores de las raíces entran en una etapa de germinación, donde empieza el crecimiento de la hifa ramificando en todas las direcciones con la finalidad de encontrar raíces hospederas y así comenzar con el desarrollo de estructuras dentro de la raíz de la planta (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

La formación intracelular de las estructuras fúngicas y el grado de colonización de las raíces es regulada por la planta a través de una reestructuración de las células de la raíz, las cuales tienen que disponerse para albergar el hongo, esta reorganización implica la expresión de un grupo de moléculas que activan un grupo de mecanismos fisiológicos en las células de la planta que en su gran mayoría son desconocidos y no han sido estudiados a fondo (Gutjahr, 2014).

2.1.10 Importancia de las micorrizas

Las micorrizas son fundamentales para una agricultura sostenible, ya que éstas proporcionan diversos beneficios a las plantas, mejorando significativamente la absorción de agua y nutrientes (Di Martino et al., 2019; Malhi et al., 2021), promueve la tolerancia a diferentes estreses bióticos y abióticos (Al-Karaki y Williams, 2021), en suelos contaminados por metales pesados, otorgan mayor resistencia, debido a la capacidad de inmovilizar los metales en la raíz (Carrillo-Saucedo et al., 2022) y mejora la resistencia a enfermedades (Damin et al., 2020).

2.1.11 Micorriza arbuscular

Las micorrizas arbusculares, originalmente conocidas como micorrizas vesículo-arbuscular, son relaciones mutualistas que se establecen principalmente con el grupo de hongos Glomeromycota (Pérez y Roja, 2011). Estas micorrizas tienen la característica de desarrollar una red de micelio que tiene la capacidad de explorar el suelo, captar nutrientes y agua para la planta (Rivillas et al., 2019), hifas intraradicales, arbúsculos, micelio y esporas. El termino arbuscular, se debe a la forma de sus estructuras desarrolladas dentro de las células corticales (Smith y Read, 2008).

Una micorriza arbuscular tiene la capacidad de crecer y extenderse dentro de las raíces de la planta sin causar síntomas de enfermedad, desarrollando internamente en las células corticales tres componentes importantes como: hifas filamentosas que sirven como soporte para la espora (Espinoza, 2013); los arbúsculos son los encargados de la transferencia de los nutrientes, y las vesículas que se encargan del almacenamiento de los nutrientes como lípidos y gránulos de glicógeno (Oehl et al., 2011), además, estas vesículas pueden funcionar como propágulos del hongo (Cheng et al., 2021).

Por último, la división taxonómica de que define a las micorrizas arbusculares, se compone de cinco ordenes diferentes, 15 familias, 38 géneros, entre los que se destacan *Acaulospora spp.*, *Gigaspora spp.*, *Glomus spp.*, *Sclerocystis spp.*, y *Scutellospora spp.*, con aproximadamente 280 especies dentro de ellos (Jobim y Goto, 2016).

2.2 Marco de Referencia

2.2.1 Impacto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento y desarrollo de plantas de género *Prunus* estudios internacionales

En china, Bi et al. (2021) llevaron a cabo un estudio sobre la inoculación de micorrizas arbusculares para facilitar el crecimiento y la fotosíntesis de plántulas de albaricoque (*Prunus sibirica* L.) se determinó el impacto de la inoculación; se midieron varios parámetros, incluyendo la altura total de los brotes, el diámetro del cuello de la raíz, el número de hojas, además, se implementó un sistema portátil de fotosíntesis (Li-6400; Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EE.UU.) para determinar la eficiencia fotosintética de las plántulas. La inoculación de hongos arbusculares se realizó en dos cantidades (0 y 100 g de inoculo por plántula), en tres diferentes niveles de sombra (1900, 1100 y 550 $\text{Imol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y con tres edades (1, 3, 5 años) de trasplante. Los resultados indicaron que la colonización micorrízica mejoró significativamente la biomasa de las plántulas en comparación con las plántulas no micorrizadas; de igual forma, se observó un aumento notable en la fotosíntesis, la conducción estomática, la tasa de transpiración, y la eficacia en el uso del agua en las plántulas micorrizadas, lo que ejerció en el desarrollo favorable del albaricoque.

En tanto, en *Prunus africana* en la región de Camerún, se estudiaron los efectos de la inoculación micorrízica arbuscular utilizados para la propagación vegetativa, el crecimiento de las plantas fue medido mediante la longitud del tallo, el número de hojas, la longitud de las hojas y la densidad de las raíces; los resultados mostraron una gran capacidad de mejora del crecimiento, por ejemplo, las plantas inoculadas tuvieron una longitud 19 y 40 cm, con respecto a las plantas control con una longitud de 12 y 24 cm; en cuanto al número de hojas registraron una media de 3 a 6, con una longitud de 10 y 30 cm, mientras que las plantas control tuvieron una media de 11 y 28 cm respectivamente. Para la densidad de las raíces se registraron diferencias significativas entre los tratamientos. Con respecto a la inoculación micorrízica, ésta favorece el establecimiento de las plantas, otorgando una resistencia eficaz al trasplante de campo, en la regeneración de *Prunus africana* (Kamko et al., 2020).

De manera similar, Gluszczyk et al. (2020) en Polonia, estudiaron la influencia de bioproductos combinados con hongos micorrizicos para evaluar el crecimiento y rendimiento del cerezo dulce (*Prunus avium*). Se midió el crecimiento de las raíces mediante el cálculo de la longitud de la superficie, el diámetro, el volumen y el número de puntas de las raíces de los árboles, la inoculación fue realizada en dosis de 200 g por árbol, lo que resultó en un aumento significativo de la colonización micorrízica por la combinación de los bioproductos con las micorrizas arbusculares. Esta inoculación favoreció el desarrollo del sistema radical de los árboles inoculados, mejoraron también la absorción de fósforo y zinc. Además, se reportó que los árboles micorrizados mostraron un mejor crecimiento, respaldado por la mejora en los parámetros de crecimiento de las raíces.

Asimismo, se evaluaron los efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares en la resistencia al estrés. En Francia, Shahvali et al. (2020), evaluaron el efecto de la simbiosis micorrízica arbuscular sobre la tolerancia al estrés salino en el portainjerto GF677 (*Prunus dulcis* x *Prunus persica*), midiendo los parámetros fisiológicos de las plantas como la clorofila a, clorofila b, clorofila total, esto mediante la absorción medida por espectrofotometría (645, 663 y 470 nm); la inoculación micorrízica se llevó a cabo mediante la aplicación de una solución soluble de 100g de inoculo (que contenía hongos, esporas y propágulos) utilizando dos tipos de inóculos *R. intraradices* y con *F. mosseae*. Los resultados mostraron que los parámetros fisiológicos mejoraron (clorofila, azúcares solubles y el contenido de prolina) y una mayor cantidad de enzimas antioxidantes en comparación con las plantas no inoculadas, asimismo, se observó que las plántulas tuvieron una mayor resistencia a suelos salinos, sin presentar daño alguno, y debido a la mejoría de los parámetros fisiológicos se pueden traducir en un mejor crecimiento y adaptabilidad a entornos que podrían causar estrés a la planta.

En contraste, un estudio realizado en durazno (*Prunus persica*), evaluó el efecto de la inoculación micorrízica utilizando dos consorcios fúngicos (*F. mosseae* y *S. indica*) sobre el crecimiento de las plantas, así como en las poliaminas, la prolina y los metabolismos, con el fin de determinar cómo estas plantas pueden tolerar las inundaciones a las que fueron sometidas durante el estudio. Se determinó el crecimiento de las plantas mediante

la frecuencia de colonización de hongos en las raíces *F. mosseae* (96% y *S. indica* (53.6%), incluyendo el número de hojas, la altura de la planta y el diámetro del tallo, los resultados mostraron que la tasa de crecimiento de la altura de la planta aumento significativamente con la inoculación de *F. mosseae*, asimismo, la tasa del crecimiento del diámetro del tallo aumento en ambos inóculos. La inoculación de *F. mosseae* aumento la biomasa de los brotes y las raíces en un 21.3% y un 79.1%, de forma similar, *S. indica* aumento las biomásas en un 22.7% y un 20.4%. En ambos casos, los dos inoculantes mostraron una tolerancia a las inundaciones de las plantas, sin embargo, *S. indica* promovió la prolina, la cual alivio los daños provocados por inundación (Liang et al. 2023).

Adicionalmente, Zai et al. (2022), se centraron en el cultivo de la ciruela de playa (*Prunus marítima*), donde estudiaron las medidas para aumentar el crecimiento del ciruelo en suelos alcalinos, mejorando la absorción de nutrientes y reduciendo los problemas causados por la salinidad en los parámetros de fotosíntesis. Los resultados mostraron que, la aplicación de hongos micorrizicos arbusculares incremento los parámetros de crecimiento del ciruelo de playa, además, mejoro la eficiencia fotosintética y la concentración de pigmentos en las condiciones salinas, al optimizar la absorción de Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K). Sin embargo, los autores también destacaron que la combinación de micorrizas con un hongo solubilizador de fosfato, produjo una mejor respuesta de crecimiento aún más favorable en las plantas, mitigando los efectos causados por la sal.

2.2.2 Aplicación de micorrizas arbusculares para optimizar el crecimiento y desarrollo de plantas del género *Prunus* en México

En México, la aplicación de las micorrizas arbusculares para beneficiar el crecimiento y desarrollo de plantas del género *Prunus* es un campo poco estudiado. La mayoría de las investigaciones existentes se han centrado en otras especies frutales de diferentes géneros, como el aguacate (*Persea americana* Mill.) (Bañuelos et al., 2017), el cacao (*Theobroma cacao* L.) (Pérez Moncada et al., 2019) y la papaya (*Carica papaya*) (Quiñones Aguilar et al., 2019), entre otros. Los pocos estudios relacionados datan de años anteriores, sumando a esto, la falta de información actual sobre el uso de biofertilizantes genera la necesidad de investigar más este campo.

En plantas de durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch.), se evaluó el efecto de la vermicomposta y la inoculación de micorrizas arbusculares, para el crecimiento inicial de las plántulas, donde se determinó la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas y se determinó las concentraciones de NPK en las hojas de cada uno de los tratamientos. Con forme a los resultados, se encontró que la micorrización contribuyo a una mayor altura de los brotes, así mismo, al número de hojas que fue superior, sin embargo, en las mediciones del tallo, estas no mostraron diferencias a las plantas testigo, por parte de las concentraciones, solo en Fosforo (P) y Potasio (K) se obtieron valores altos, dejando a un lado el Nitrógeno que estuvo por debajo de lo esperado. Por último, el autor detalla que la mezcla del vermicomposta con las micorrizas, duplican los valores obtenidos a las micorrizas por si solas, inclusive el tratamiento con solo vermicomposta supera los valores obtenidos de la micorrización arbuscular en plántulas de durazno (Alvarado-Raya, 2017).

Asimismo, en ocasiones se pueden obtener resultados no tan favorable tal como lo demuestran Castillo et al. (2006), quienes evaluaron la eficacia de diferentes productos comerciales endomicorrizicos en plántulas de durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch.), se analizó las variables como el crecimiento del tallo, el desarrollo de las raíces, el número de hojas total y el porcentaje de colonización, donde la inoculación se llevó a cabo de manera directa con la raíces de la planta al momento del trasplante, se encontró en los resultados que no hubo diferencias significativas entre los productos comerciales en relación con el crecimiento vegetativo, ya que la mayor altura fue de 96 cm, mientras que la peor de ellas fue de 89.9 cm que corresponde al testigo, ya que todos respondieron de manera similar, donde el porcentaje de micorrización en la raíces oscilo entre 1% y el 14%, siendo este último el más alto de todos.

2.3 Literatura citada

- Al-Karaki, G.N., Williams, M. (2021). Mycorrhizal mixtures affect the growth, nutrition, and physiological responses of soybean to water deficit. *Acta Physiol Plant* 43, 75. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03250-0>
- Allen, M.F. (1991). *The Ecology of Mycorrhizae*. Cambridge University Press, 184 Pp.
- Alvarado Raya, H. E. (2017). Peach seedling growth with mycorrhiza and vermicompost: Crecimiento de plántulas de durazno con micorrizas y vermicomposta. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 11(2), 48–57. <https://doi.org/10.54167/tch.v11i2.157>
- Avendaño-Gómez, A., Lira-Saade, R., Madrigal-Calle, B., García-Moya, E., Soto-Hernández, M., & Romo de Vivar-Romo, A. (2015). Manejo y Síndromes de domesticación del capulín (*Prunus serótina* Ehrh ssp. *capuli* (Cav.) McVaugh) en comunidades del estado de Tlaxcala. *Agrociencia*, 49, 189–204. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1140>
- Bañuelos, J., Sangabriel Conde, Wendy, Gavito, M., Trejo Aguilar, D., Camara, S., Medel Ortiz, R., & Carreon, Y. (2017). Efecto de diferentes niveles de fósforo en aguacate (*Persea americana*) inoculado con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1509–1520. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.507>
- Bastipati, S.B., Prasad, S., Vaishnavi, D.S., Harikrishna, K., Reddy, K.V. (2024). Soil Microorganisms and Mycotoxins. In: Aransiola, S.A., Atta, H.I., Maddela, N.R. (eds) *Soil Microbiome in Green Technology Sustainability*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71844-1_17
- Bi, Y., Xie, L., Wang, Z. et al. (2021). Arbuscular mycorrhizal symbiosis facilitates apricot seedling (*Prunus sibirica* L.) growth and photosynthesis in northwest China. *Int J Coal Sci Technol* 8, 473–482. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00408-6>
- Blancas Vázquez, J.J. et al. (2023). Ethnobotany of the Nahua People: Plant Use and Management in the Sierra Negra, Puebla, Mexico. In: Casas, A., Blancas Vázquez, J.J. (eds) *Ethnobotany of the Mountain Regions of Mexico*. Ethnobotany of Mountain Regions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99357-3_19
- Blancas, J., J. Caballero y L. Beltrán-Rodríguez. (2017). Los Productos Forestales No Maderables en México: panorama General. Red Temática Productos Forestales No Maderables. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt No. 280901), México.
- Bonfante, P., & Requena, N. (2011). Dating in the dark: how roots respond to fungal signals to establish arbuscularmycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(4): 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.03.014>

- Camarena-Gutiérrez, G. (2012). Interacción planta-hongo micorrízicos arbusculares. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 18(3): 409-421. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.093>
- Camargo-Ricalde S. L., Montañón N. M., Rosa-Mera C. J., Montañón Arias, S. A. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria* 13(7). <https://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/art72.pdf>
- Carrillo Sánchez L. E. (2015). Micorrizas para principiantes. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Desde el Herbario CYCY 7: 176-179. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2015/2015-11-19-Carrillo-Sanchez-Micorrizas-para-principiantes.pdf
- Carrillo-Saucedo, S. M., J. Puente-Rivera, S. Montes-Recinas y R. Cruz-Ortega. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana* 129. <http://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Castillo-González, A. M. (2006). Inoculation of peach with commercial mycorrhizal products. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 24(2), 293. Retrieved from <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1521>
- Cheng, H. Q., Giri, B., Wu, Q. S., Zou, Y. N. y Kuca, K. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate drought stress in citrus by modulating root microenvironment. *Archives of Agronomy y Soil Science*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1878497>
- CONABIO. (2012). *Prunus serotina*. Obtenido de Gobierno de la Republica de México. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles45doctos/60rosac6m.pdf
- Damin, S., Carrenho, R., Martins, S. (2020). The influence of mycorrhization on the growth of *Zea mays* L. and the sclerification of foliar tissues susceptible to chewing insect attacks. *Brazilian Journal of Botany*. 43(3), 493-502. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00621-8>.
- Di Martino, C., Fioretto, A., Palmieri, D. et al. (2019). Influence of Tomato Plant Mycorrhization on Nitrogen Metabolism, Growth and Fructification on P-Limited Soil. *J Plant Growth Regul* 38, 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09923-y>
- Emanuel Valdés F., Abarca C., Paula Colombo R., Analía S. A. (2020). Introducción y generalidades. En N. Nazareno S. M. C., Fabiana R. M., Cecilia A. M. (Eds.). *Micorrizas arbusculares: Biología y aplicaciones en el sector agro-forestal*. pp. 11-35. Editorial de la UNLP. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/book/1504>
- Espinoza, A. (2013). Caracterización morfológica de esporas de micorrizas del Genero *Glomus* sp. A nivel de invernadero y de campo en el cultivo de soya *Glycine max* L. *Revista Científica Ciencias Naturales Y Ambientales*, 7(1), 10. <https://doi.org/10.53591/cna.v7i1.207>

- Flores-Juárez, D. J., Villegas-Aparicio, Y., Castro-Rivera, R., Gómez-Vázquez, A., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Castañeda Hidalgo, E. (2020). Inoculación de avena forrajera con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, (24), 191–199. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2369>
- Fresnedo-Ramírez, J., Segura S., & Muratalla-Lúa A. (2011). Morphovariability of capulín (*Prunus serótina* Ehrh.) in central-western region of Mexico from a plant genetic resources perspective. *Genet Resour Crop Evol*, 58 (4): 481-495. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9592-2>.
- García-Flores, A., Ayala Enríquez, M., Cabrera González, J., Velázquez Miranda, D., Martínez Bahena, C., & Pino Moreno, J. (2020). USEFUL PLANTS OF THE PLAYGROUNDS OF SANTO DOMINGO, OCOTITLÁN, TEPOZTLÁN, MORELOS, MÉXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2). doi:<http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3031>
- Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S. et al. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nat Rev Microbiol* 18, 649–660. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>
- Gluszczyk S., Derkowska E., Sas-Paszt L., Sitarek M., Sumorok B. (2020): Influence of bioproducts and mycorrhizal fungi on the growth and yielding of sweet cherry trees. *Hort. Sci. (Prague)*, 47: 122–129. <https://doi.org/10.17221/102/2018-HORTSCI>
- Gutjahr, C. (2014). Phytohormone signaling in arbuscularmycorrhizal development. *Current Opinion in Plant Biology*. 20:26–34. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.04.003>
- Guzmán, F. A., Segura-Ledesma, S. D., & Almaguer-Vargas, G. (2020). El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(1), 261-266. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611866>
- Jobim, K., Goto, B. T. (2016). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) in maritime sand dunes of Brazilian northeast. *Studies in Fungi* 1 (1): 43-55. <https://doi.org/10.5943/sif/1/1/4>
- Kamko, J. D., Tchichoua, Y.H., Ngonkeu, E. L M. et al. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi used as biofertilizer for the vegetative propagation of *Prunus Africana* (Hook.f.) Kalkman. *International Journal of Plant Research* 10(3): 53-60. <https://doi.org/10.5923/j.plant.20201003.02>
- Liang, S., Zou Y., Shu B., Wu Q. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic fungi differentially modulate polyamines or proline of peach in response to soil flooding. *Pedosphere*. 34(2), pp. 460-472. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.05.002>
- López-Hernández, E. F., Santiago-Mejía, H., & Ortiz, Y. G. (2024). CONOCIMIENTO ETNOBOTÁNICO ASOCIADO AL ÁRBOL DE CAPULÍN (*Prunus serotina* Ehrh.) EN COMUNIDADES MAZAHUA DE JOCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/566>

- Mabberley, D. J. (2017). *Mabberley's Plant-Book: A Portable Dictionary of Plants, Their Classification and Uses* (4th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316335581>
- Malhi, G. S., Kaur, M., Kaushik, P., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., & Ahmad, P. (2021). Arbuscular mycorrhiza in combating abiotic stresses in vegetables: An eco-friendly approach. *Saudi journal of biological sciences*, 28(2), 1465–1476. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.001>
- Martínez-Gómez, P., (2017). Predicción científica y prescripción en mejora genética vegetal en cuanto ciencia aplicada de diseño: El caso de la mejora de frutales del género *Prunus*. *Acta Agronómica*, 66(1), 115-127. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.52329>
- Mcvaugh, R. (1951). *Prunus serotina* subsp. *capuli*. Consultado el 15 de agosto de 2024:http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/60-rosac6m.pdf
- Nadal, M., and Paszkowski, U. (2013). Polyphony in the rhizosphere: presymbiotic communication in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion Plant Biology*, 16(4): 473-479. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.005>
- Nedelin Teodor. (2014). Ectomycorrhiza-Nature and significance for functioning of forest ecosystems. *Forestry Ideas*, Vol. 20, No. 1 (47): 3-29. https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?journalFilter=50
- Oehl, F., Sieverding, E., Palenzuela, J., Ineichen, K., y Alves da Silva, G. (2011). Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA Fungus*, 2(2), 191-199. <https://doi.org/10.5598/ima fungus.2011.02.02.10>
- Páez-Reyes, L., Sánchez-Olarte, J., Velasco-Torres, M., Álvarez-Gaxiona, J., & Argumendo-Macías, A. (2013). Propuesta de estrategia para el mejoramiento del cultivo de capulín en los municipios de Domingo Arenas, Calpan y San Nicolás de los Ranchos. *Ra Ximhai*, 109-119. <https://raximhai.uaim.edu.mx/index.php/rx/article/view/751>
- Pérez Moncada, Urley Adrian, Ramírez Gómez, Margarita, Serralde Ordoñez, Diana Paola, Peñaranda Rolón, Andrea María, Wilches Ortiz, Wilmar Alexander, Ramírez, Luciano, & Rengifo Estrada, Gersain Antonio. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Pérez, C. A., Rojas, S. J., y Montes, V. D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 3(2), 366–385. <https://doi.org/10.24188/recia.v3.n2.2011.412>

- Potter, D. (2011). Prunus. In: Kole, C. (eds) Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16057-8_7
- Quiñones Aguilar, E. E., Hernández Cuevas, L. V., López Pérez, L., & Rincón Enríquez, G. (2019). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi native from Agave rhizosphere as growth promoters in papaya. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 37(2), 163–174. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.397>
- Ramírez-Mandujano, C. A., & Vargas-Campos, P. (2015). Control genético de crecimiento en vivero en colecta de Prunus serótina. *Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias*. VOL. 16, NÚM. 1, pp. 25-29. <https://www.biologicas.umich.mx/index.php?journal=biologicas&page=article&op=view&path%5B%5D=192>
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H. et al. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23:515–531. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Rivillas, C. A., Calle, C. M., & Ángel, C. A. (2019). Micorrizas Arbusculares. En Centro Nacional de Investigaciones de café (Ed.), *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustando a las condiciones particulares de Huila* (pp. 52-79). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0005_3.
- Rodríguez, L. y B. Farfán. (2014). Manejo tradicional del capulín (Prunus serotina spp. capuli) en San Francisco Pichátaro, Michoacán. En: Arias, G., F. Zurita y M. L. Uranga (Eds.). *Sustentabilidad e interculturalidad paradigmas entre la relación cultura y naturaleza*. Michoacán, México.
- Rzedowski Rotter, J. (2021). La familia Rosaceae en México. *POLIBOTÁNICA*, 1(51). <https://www.polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/929>.
- Schüßler, A., Walker C. (2010). The Glomeromycota: a species list with new families and new genera. Gloucester, in libraries at The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich and Oregon State University.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2017). El capulín, cerezo nacional. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/el-capulin-cerezo-nacional>. Consultado el 06 de abril de 2023.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). Ciruela, un dulce sabor. Consultado el: 31 de julio de 2023. Obtenido de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/ciruela-un-dulce-sabor?idiom=es>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). Que rica está la cereza. Consultado el: 31 de julio de 2023. Obtenido de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-rica-esta-la-cereza>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Durazno: una suave caricia al paladar. Consultado el: 31 de julio de 2023. Obtenido de:

<https://www.gob.mx/siap/articulos/durazno-una-suave-caricia-al-paladar?idiom=es>.

- Shahvali, R., Shiran, B., Ravash, R., Fallahi, H., & Banović Đeri, B. (2020). Effect of symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi on salt stress tolerance in GF677 (peach x almond) rootstock. in *Scientia Horticulturae* Elsevier, Amsterdam., 272. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109535>
- Smith, S. E. y D. J. Read. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, New York. Vol. 2, p. 780.
- Téllez, O., E. Matta, M. Diazgranados, N. Kühn, E. Castillo-Lorenzo, R. Lira, L. Montes-Leyva, I. Rodríguez, C. M. Flores, M. Way, P. Dávila y T. Ulian. (2020). Native trees of Mexico: diversity, distribution, uses and conservation. *PeerJ* 8: e9898. <https://doi.org/10.7717/peerj.9898>
- Zai, XM., Fan, JJ., Hao, ZP. et al. (2021). Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing fungi on nutrient uptake and photosynthesis of beach palm under salt stress environment. *Sci Rep* 11, 5761. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84284-9>

CAPÍTULO III. Métodos de escarificación para mejorar la germinación de semillas de capulín (*Prunus serotina*): Un análisis longitudinal y transversal*

Eduardo González-Hernández¹, Alejandro Corona-Ambriz^{1*}, Elizabeth Hernández-Acosta², Ma. Amparo Máxima Borja-de la Rosa¹, Leopoldo Mohedano-Caballero¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: acoronaa@chapingo.mx

Resumen

Introducción: La propagación sexual de *Prunus serotina* presenta desafíos debido a la dormancia de las semillas. Para superar dicha condición y maximizar la tasa de germinación se han implementado varios métodos de escarificación.

Objetivo: Evaluar métodos de escarificación, físicos y químicos, para contrarrestar los mecanismos inhibidores y aumentar el porcentaje de germinación de las semillas de *Prunus*.

Materiales y métodos: La semilla se recolectó de cinco árboles ubicados en la comunidad de Ocotepec, municipio de Ocotepec, Puebla, México. Se evaluaron dos métodos de escarificación, remojo-secado e inmersión en ácido clorhídrico al 10% (HCl), utilizando semillas con y sin endocarpio. El diseño experimental fue completamente al azar con cinco repeticiones. Además, se utilizó un modelo logístico y mixto para hacer el análisis longitudinal y transversal del porcentaje de germinación.

Resultados y discusión: Los métodos remojo-secado y remojo en HCl aplicados a semillas con endocarpio, exhibieron los porcentajes de germinación más bajos. Mientras que, los métodos donde se usaron semillas sin endocarpio resultaron ser los más

efectivos, tanto en términos de porcentaje de germinación como en el tiempo necesario para alcanzarlo, de 21 a 28 días. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para optimizar el manejo de las semillas en programas de producción de plantas de esta especie e incluso en programas de reforestación.

Conclusión: La eliminación del endocarpio mejora el porcentaje de germinación de las semillas, pero aplicar los métodos de remojo-secado o remojo con ácido clorhídrico se incrementa significativamente el porcentaje de germinación con respecto al testigo.

Palabras clave: Endocarpio, mecanismos inhibidores, dormancia, ácido clorhídrico, remojo-secado.

Abstract

Introduction: The sexual propagation of *Prunus serotina* presents challenges due to seed dormancy. To overcome this condition and maximize the germination rate, various scarification methods have been implemented.

Objective: To evaluate physical and chemical scarification methods to counteract inhibitory mechanisms and increase the germination percentage of *Prunus* seeds.

Materials and Methods: Seeds were collected from five trees located in the community of Ocotepec, in the municipality of Ocotepec, Puebla, México. Two scarification methods were evaluated: soak-dry and immersion in 10% hydrochloric acid (HCl), using seeds with and without endocarp. The experimental design was completely randomized with five replicates. Additionally, a logistic mixed model was used to perform longitudinal and cross-sectional analysis of the germination percentage.

Results and Discussion: The soak-dry and HCl soaking methods applied to seeds with endocarp showed the lowest germination percentages. In contrast, methods using seeds without endocarp proved to be the most effective, both in terms of germination percentage and the time required to achieve it, ranging from 21 to 28 days. These findings provide valuable information for optimizing seed handling in plant production programs for this species and even in reforestation programs.

Conclusion: Removing the endocarp improves the germination percentages of seeds, and applying the soak-dry or hydrochloric acid soaking methods significantly increases germination percentage compared to the control.

Keywords: *endocarp, inhibitory mechanisms, dormancy, hydrochloric acid, soak-dry.*

Introducción

El capulín (*Prunus serotina*) es una especie frutícola nativa de México, pertenece a la familia Rosaceae, entre las que se encuentran las ciruelas (*Prunus domestica*), cerezas (*Prunus avium*), almendras (*Prunus dulcis*), tejocotes (*Crataegus mexicana*) entre otros; esta especie se conforma por tres subespecies (*capulí, serotina, virens*) descritas por Rohrer (2014). En México puede encontrarse distribuido principalmente en Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México, Morelos y Michoacán (Fresnedo-Ramírez et al., 2011). *P. serotina* se conoce desde épocas prehispánicas por su característico fruto (Rzedowski, 2021), su frondoso follaje y por su función como barrera rompevientos en los campos de cultivo.

Si bien, no es una especie con un gran valor económico, si llega a tener un simbolismo para las personas que lo consideran un árbol multipropósito debido a que todo en él se aprovecha, tanto su fruto comestible, sus hojas y raíces por sus propiedades farmacológicas, maderable y por su adaptabilidad climática (Guzmán et al., 2020); así mismo, por su alta tolerancia a suelos pobres y erosionados (Niembro et al., 2010). No obstante, a pesar de encontrar árboles de *P. serotina* en parcelas agrícolas y en orillas de carreteras, y de tener múltiples cualidades, nunca se ha intentado el cultivo de esta especie (Fresnedo-Ramírez et al., 2011), resultando en una propagación casi nula; debido a que las plántulas germinan lentamente y en bajos porcentajes, porque la semilla está protegida por una cubierta leñosa o endocarpio que la protege, evitando la penetración del agua, lo que lleva a una germinación irregular durando semanas o incluso meses (McVaugh, 1951); además, la semilla contiene inhibidores en la testa, endospermo y en el embrión.

Una alternativa para eliminar estas condiciones en las semillas son la escarificación física y química, que busca promover la permeabilidad de la testa y otras estructuras a factores abióticos, de tal manera que la germinación sea activada (Baskin & Baskin, 2014). Por su parte, los métodos químicos consisten en la inmersión de las semillas en sustancias corrosivas, como ácido sulfúrico o ácido clorhídrico (Soriano *et al.*, 2014).

El modelo logístico se utiliza comúnmente en diversos campos; tales como: la biología, ecología, economía y la demografía, para describir el crecimiento de una población, el desarrollo de una enfermedad, la difusión de una tecnología, entre otros fenómenos que exhiben un crecimiento limitado. El objetivo de la presente investigación es evaluar métodos de escarificación físicos y químicos para contrarrestar los mecanismos inhibidores con el fin de aumentar el porcentaje de germinación de las semillas de *Prunus serotina*.

Materiales y métodos

Material Biológico

La semilla utilizada en la presente investigación se obtuvo de frutos maduros recolectados en cinco árboles de capulín (*Prunus serotina*) ubicados en la comunidad de Ocotepec, en el municipio de Ocotepec, Puebla, México (19°33'23" latitud norte y 97°38'56" longitud oeste, a una altitud promedio de 2440 msnm) (Figura 1). La selección de los frutos se realizó asegurando que no presentaran daños físicos, ni signos de patógenos. Para la obtención de semillas, se removió la pulpa de los frutos lavándolos manualmente con agua común. Posteriormente, las semillas se dejaron secar a temperatura ambiente (25°C) durante 72 h. El peso fresco de cada semilla fue muy homogéneo, oscilando entre 0.74 y 0.85 g. Una vez secas, las semillas se almacenaron en bolsas de polietileno herméticas de 26.8 x 24.1 cm, que son permeables al bióxido de carbono y oxígeno, pero impermeables a la humedad. Las bolsas se almacenaron en un cuarto oscuro a una temperatura de 24 °C hasta el establecimiento del experimento, programado para noviembre 2023. Finalmente, se tomaron 1200 semillas (equivalentes a 1 kg) de las recolectadas de los cinco árboles.

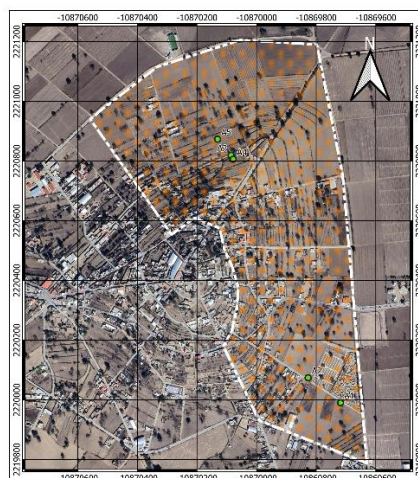


Figura 1. Zona de estudio.

Métodos de Escarificación

Los métodos de escarificación para inhibir la dormancia consistieron en el uso de semillas con y sin endocarpio, para retirar el endocarpio se emplearon pinzas de punta para ejercer presión hasta separar las mitades y liberar la semilla. Posteriormente, las semillas se sometieron a una inmersión en ácido clorhídrico (HCl) al 10% durante 25 minutos y después se enjuagaron con agua común definiendo los tratamientos C y D. Por otra parte, el método de remojo y secado se realizó conforme a lo propuesto por Camacho (2021), modificando los ciclos a tres; es decir, las semillas con y sin endocarpio se sometieron a un día de remojo en agua y un día de secado sobre servitoallas a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C), definiendo los tratamientos A y B, respectivamente (Cuadro 1). Finalmente, semillas con y sin endocarpio representaron los tratamientos E (testigo) y F, respectivamente.

Cuadro 1. Métodos de escarificación: Tratamientos.

Método	Semilla	Tratamiento
Remojo/secado	Con endocarpio	A
	Sin endocarpio	B
Ácido clorhídrico	Con endocarpio	C
	Sin endocarpio	D
Testigo	Con endocarpio	E
	Sin endocarpio	F

Diseño Experimental

El diseño experimental fue completamente al azar con cinco repeticiones, cada repetición incluyó 40 semillas, para cada uno de los seis tratamientos (que incluyeron grupos de semillas con y sin endocarpio, dos métodos de escarificación y un testigo). El 26 de noviembre de 2023, las 1200 semillas fueron sembradas en charolas plásticas de 200 cavidades (28 cm de ancho x 54 cm de largo y 1 mm de grosor), colocando una semilla por cavidad a una profundidad de 1.5 cm. Se estableció una mesa (1.4 m de ancho x 3.8 m de largo) en la cual se colocaron las seis charolas para cada tratamiento. Cada cavidad tiene un diámetro de 2.3 cm y una profundidad de 4.3 cm, lo que resulta en un volumen total de 17.86 cm³. El sustrato de germinación consistió en una mezcla con relación 3:2, de Peat Moss (un abono natural y orgánico proveniente del musgo *Sphagnum*) y Agrolita (de origen mineral, con una porosidad del 34% al 65%). El experimento se desarrolló en un invernadero ubicado en el municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México (19°22'33.7" latitud norte y 98°59'10.2" longitud oeste), con dimensiones de 4.2 m de largo y 3.3 m de ancho y cubierta plástica de color blanquecina lechoso (30% sombra de 6.2 m de ancho). La temperatura promedio del invernadero fue 28°C durante el día y 16 °C por la noche; mientras que la humedad relativa promedio se mantuvo en 60%.

El conteo de las semillas germinadas se realizó semanalmente, después de la siembra (26 de noviembre de 2023); se consideró que la semilla había germinado cuando la radícula alcanzó una longitud de 2 mm o cuando se daba la emergencia de sus hojas primarias. Durante la germinación y la emergencia de las plántulas, el sustrato se regó con agua natural cada dos días, a las 17:00 h. Las mediciones se realizaron durante siete semanas; es decir, el experimento finalizó el 14 de enero 2024.

Análisis Estadístico

El objetivo del análisis, a través del tiempo, es examinar y comparar las tendencias de las respuestas a los tratamientos, incluso comparar tratamientos en tiempos específicos. El análisis estadístico se realizó utilizando el Software R (R Core Team, 2023).

Para analizar el porcentaje de germinación acumulado en función del tiempo para cada tratamiento se utilizó un modelo logístico con tres parámetros; es decir,

$$y = \alpha + \frac{\alpha}{1 + \left(\frac{d}{\beta}\right)^\gamma}$$

Donde:

y: Porcentaje de germinación acumulado.

d: Días transcurridos desde la siembra.

α : Parámetro que representa el límite superior del porcentaje de germinación.

β : Parámetro que representa el punto de inflexión del modelo logístico. Es el valor de la variable independiente (días transcurridos desde la siembra) en el cual la tasa de germinación es máxima.

γ : Parámetro que controla la pendiente de la curva. Cuanto mayor sea el valor de γ , más abrupta será la pendiente de la curva alrededor del punto de inflexión.

Para realizar el análisis longitudinal y transversal del comportamiento del porcentaje de germinación se utilizó un modelo mixto debido a la existencia de correlación entre las mediciones obtenidas a través del tiempo. El modelo mixto fue:

$$Y = X\beta + Z\gamma + \varepsilon, \quad \gamma \sim N(0, D) \text{ y } \varepsilon \sim N(0, R)$$

Donde:

Y: Variable respuesta

X: Covariables

Z: Matriz diseño del componente aleatorio

β y γ : Parámetros del componente fijo y aleatorio, respectivamente.

Resultados y discusión

Germinación de semillas de *Prunus serótina*

Antes de iniciar el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, sobre la evaluación de diferentes métodos de escarificación, donde la variable respuesta fue el

porcentaje de semillas germinadas durante un período de siete semanas; es importante destacar que en la primera semana no se observó ninguna germinación, lo que llevó a su omisión parcial en el análisis y a partir de la quinta semana (35 días), el porcentaje de germinación se mantuvo constante hasta la séptima semana, lo cual explica la ausencia de las estadística descriptiva de tales semanas en el Cuadro 2. De acuerdo con los resultados (Cuadro 2), se observó que el 50% de los tratamientos (B, D y F); lo cuales comprendían semillas sin endocarpio mostraron una respuesta a partir de la segunda semana (14 días), evidenciando el efecto del retiro del endocarpio de las semillas logrando acelerar y aumentar el proceso de germinación, lo que coincide con investigaciones previas en especies de *Prunus*. Por ejemplo, Cetinbas y Koyuncu (2006) observaron un aumento en la germinación de *Prunus avium*; mientras que, García-Gusano et al. (2004) reportaron efectos positivos en *Prunus dulcis*; asimismo, Ghayyad et al. (2010) observaron resultados comparables en *Prunus mahaleb*, de esta manera se refuerza la idea de que la eliminación del endocarpio resulta en una práctica efectiva para mejorar la germinación.

Por otro lado, la germinación en el resto de los tratamientos (A, C y E) inició a partir de la tercera semana (21 días), lo que respalda la hipótesis de que las semillas de la especie *Prunus* contiene inhibidores de germinación en diversas partes, incluyendo el endocarpio y el endospermo (Jensen & Kristiansen, 2009; Şan et al., 2014). En contraste, el tratamiento con el mayor porcentaje de germinación, a los 14 días, fue el B (remojo y secado sin endocarpio); mientras que, el tratamiento con el menor porcentaje de germinación fue el E (testigo) (Cuadro 2).

En la tercera semana, los tratamientos B y D mostraron porcentajes de germinación similares, con 48.5% y 47%, respectivamente; sin embargo, el tratamiento D presentó una mayor variabilidad ($ee=8.5$). Mientras que, el tratamiento E (testigo) continuó registrando el menor porcentaje de germinación, con solo un 1%. Este comportamiento se mantuvo durante la cuarta semana y los tratamientos B y D mostraron los mayores porcentajes de germinación.

Por otra parte, los tratamientos A (remojo y secado con endocarpio) y C (remojo en HCl con endocarpio) lograron duplicar el porcentaje de germinación en comparación con la

semana anterior (tercera semana). Durante la quinta semana, el comportamiento del porcentaje de germinación se mantuvo y los incrementos promedio del porcentaje fueron menores al 4% respecto a la cuarta semana. Los tratamientos B y D mostraron la mayor respuesta; aunque el tratamiento D siempre presentó una mayor variabilidad ($ee=8.4$). En contraste, el testigo tratamiento (tratamiento E) exhibió el menor porcentaje de germinación, con solo un 3% en promedio; este resultado fue semejante al reportado por Al-Absi (2010) en un estudio con semillas de *Prunus mahaleb* cuyo porcentaje de germinación estuvo entre 1.7% y 5% para semillas sin tratamiento (testigo).

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas del porcentaje de germinación.

Tratamiento	Semana 2: 14 días				Semana 3: 21 días				Semana 4: 28 días				Semana 5: 35 días			
	Me	ee	Max.	Min.	Me	ee	Max.	Min.	Me	ee	Max.	Min.	Me	ee	Max.	Min.
A	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	1.7	15.0	5.0	18.5	1.7	22.5	12.5	20.0	1.9	22.5	12.5
B	20.5	3.6	30.0	10.0	48.5	5.1	62.5	37.5	51.0	5.1	62.5	37.5	54.5	5.4	67.5	40.0
C	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.8	10.0	0.0	9.5	1.8	15.0	5.0	10.0	1.8	15.0	5.0
D	5.5	2.7	15.0	0.0	47.0	8.5	72.5	25.0	48.5	8.2	72.5	27.5	50.5	8.4	75.0	30.0
E	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	2.5	0.0	2.5	0.8	5.0	0.0	3.0	1.2	7.5	0.0
F	1.0	1.0	5.0	0.0	22.5	2.9	30.0	15.0	28.0	3.7	40.0	20.0	29.0	4.0	42.5	20.0

Me: Media, ee: Error estándar, Max: Máximo, Min: Mínimo.

Análisis longitudinal del porcentaje de germinación

Para conocer y comprender el comportamiento del porcentaje de germinación a lo largo del tiempo para cada tratamiento, se realizó un análisis longitudinal ajustando un modelo logístico y un mixto. Los resultados del modelo mixto indicaron que tanto los factores principales (Tratamientos y Tiempo) como su interacción fueron estadísticamente significativos ($p\text{-valor} = 0.0001 < \alpha = 0.05$). Esto sugiere que las diferencias en el porcentaje de germinación entre tratamientos varían a lo largo del tiempo.

Los métodos de escarificación aplicados a las semillas de capulín tuvieron un efecto significativo en el porcentaje promedio de germinación ($F_{cal}=2, 6.45$ $p\text{-valor} < 0.0001$ y $\alpha=0.05$). En contraste, los tratamientos que mostraron el mayor porcentaje promedio de germinación a lo largo del experimento (49 días), fueron el tratamiento B (remojo/secado sin endocarpio) y el tratamiento D (ácido clorhídrico sin endocarpio). Por su parte, en el

tratamiento B (remojo/secado sin endocarpio) se observó el mayor porcentaje de germinación debido a la eliminación de inhibidores de esta. Kumar et al., (2012) obtuvo resultados semejantes; es decir, se redujo el tiempo y aumento el porcentaje de germinación. Por otro lado, el tratamiento D (Ácido clorhídrico/sin endocarpio), también demostró ser eficaz, reconociendo el uso de ácidos como un método efectivo de escarificación, capaz de romper la latencia de las semillas, tal como lo reportó Pipinis et al. (2012). Además, el mismo autor concluye que el tiempo de remojo no debe ser excesivo porque podría dañar las semillas.

Es importante mencionar que ambos tratamientos mostraron respuesta desde la segunda semana, pero el tratamiento B (20.5%, ee=3.6) resultó ser estadísticamente superior al tratamiento D (5.5%, ee=2.7) con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Este hallazgo es respaldado por Camacho (2021), quien reportó un porcentaje de germinación del 88% en semillas de *Prunus serotina* en aproximadamente 25 días, aplicando tres ciclos de remojo y secado. Por su parte, Al Absi (2010), utilizó un método de escarificación con ácido sulfúrico en semillas de *Prunus mahaleb*, logrando un índice de germinación del 48.3%

En la tercera semana, se observó un porcentaje de germinación del 48.5% (ee=5.1); sin embargo, los incrementos posteriores no fueron estadísticamente significativos, finalizando con un promedio del 50.5% (ee=8.4) (Figura 2). Este resultado es comparable a lo reportado por Javanmard et al. (2014), quien encontró que el tratamiento de semillas sin endocarpio de *Prunus avium* con agua de grifo puede aumentar el porcentaje de germinación en más del 50%.

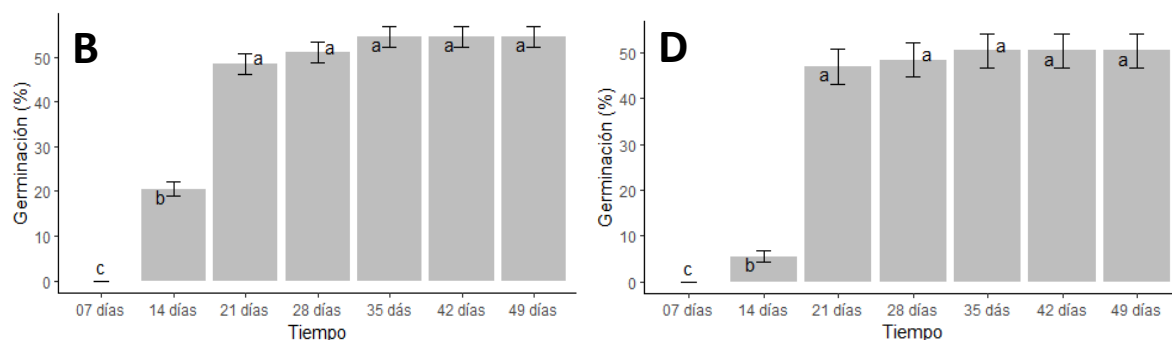


Figura 2. Comportamiento longitudinal de los tratamientos: remojo/secado sin endocarpio (B) y ácido clorhídrico sin endocarpio (D). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Asimismo, los tratamientos A y F se destacaron como los segundos más efectivos, mostraron diferencias estadísticas significativas a través del tiempo. En particular, el tratamiento A presentó una respuesta estadística significativa ($\alpha=0.05$) en la tercera y cuarta semana, duplicando su porcentaje de germinación promedio, al pasar de 9.0% a 18.5%. No obstante, estos resultados fueron inferiores a lo reportado por Castillo-Quiroz et al. (2021), quien documentó un porcentaje de germinación del 89% en semillas de *Prunus cercocarpifolia* al aplicar un método de embebimiento en semillas con endocarpio durante 48 h. Sin embargo, los incrementos en el porcentaje de germinación para el tratamiento A resultaron no ser significativos (Figura 3, A). Por lo tanto, es suficiente dejar las semillas durante 28 días para alcanzar un porcentaje máximo promedio de germinación del 20% (ee=1.94) con este tratamiento. Un factor en la obtención de estos valores se debe a la presencia del endocarpio. Kim (2019) menciona que las semillas de *Prunus yedoensis* con endocarpio presentaron una inhibición en la germinación de hasta un 31% en comparación con semillas sin endocarpio, que mostraron un 90% de germinación.

Con respecto al tratamiento F (semillas sin endocarpio), este logró al final una respuesta promedio del 29% (ee=1.79). En la tercera semana, se observó un aumento estadísticamente significativo al pasar de un porcentaje promedio de 1% al 22.5%, siendo comparable a lo reportado por Chen et al. (2007), donde informa que el 25% de las semillas de *Prunus campanulata* no escarificadas y sin endocarpio germinaron en 21 días. Asimismo, Pipinis et al (2012), reporta valores similares; donde el 22% de las semillas control, sin endocarpio, germinaron. En la cuarta semana, el incremento también fue significativo, alcanzando un promedio del 28%. Tewari et al. (2011) encontró que la eliminación de la cubierta de las semillas de *Prunus cerasoides* aumentó considerablemente la tasa de germinación; sin embargo, después de esto no se registraron diferencias estadísticamente significativas durante el resto del experimento, (Figura 3, F).

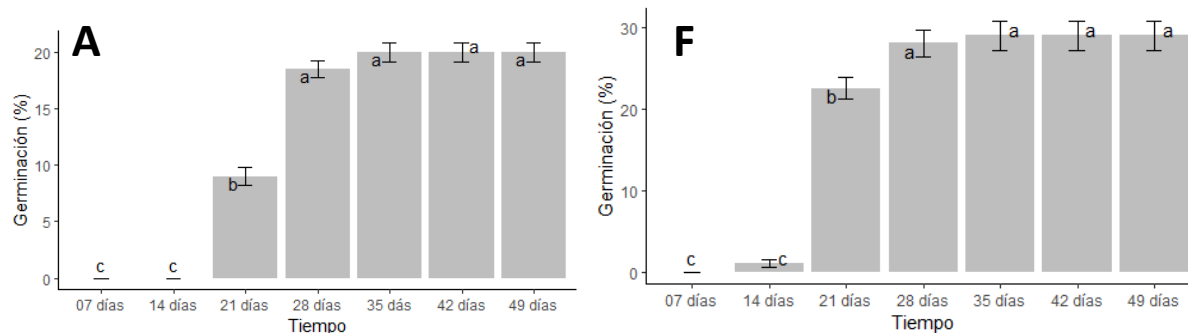


Figura 3. Comportamiento longitudinal de los tratamientos: remojo/secado con endocarpio (A) y testigo sin endocarpio (F). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

El menor porcentaje de germinación de las semillas de capulín se observó en el testigo (E); el cual fue menor o igual al 3% ($ee=1.2$) y no presentó cambios estadísticamente significativos en el tiempo (Figura 4, E). De manera similar, estudios previos documentaron porcentajes bajos de germinación; Javanmard et al. (2014) reportó un 1.66% de germinación en *Prunus Avium*, mientras que Castillo-Quiroz et al. (2021) señaló un 0% en *Prunus cercocarpifolia*, ambos casos compartieron condiciones similares al tratamiento testigo (E). Esto refuerza la idea de que el endocarpio, además de ofrecer protección, actúa como una barrera mecánica durante la germinación, al impedir el acceso de agua a su interior (Toit et al., 1979).

Finalmente, el tratamiento C (ácido clorhídrico con endocarpio) mostró un promedio de germinación final del 10% ($ee=1.8$). Este último obtuvo una respuesta significativa, tanto en la tercera como en la cuarta semana; sin embargo, los incrementos en el porcentaje de germinación, en el resto del tiempo, resultaron ser no significativos, (Figura 5 C). De manera diferente, Kim (2019), implementó ácido sulfúrico como método de escarificación, lo que no generó resultados favorables en la germinación en *Prunus yedoensis*. Asimismo, Tewari et al., (2011) reportó un comportamiento similar en *Prunus cerasoides*, lo que sugiere que el uso del HCl en concentraciones bajas podría ser ideal para no afectar significativamente las condiciones de germinación de las semillas.

En contraste, Grisez et al., (2008) señaló que el uso del ácido sulfúrico para romper o ablandar el endocarpio no tiene efecto o puede incluso tener un efecto negativo en la

germinación de las semillas de especies del género *Prunus*. Esto también lo reportó Pipini et al (2012), quien advierte que un tratamiento con ácido por tiempo prolongado puede causar daños a las semillas. En caso de usar este tratamiento (C) no es necesario esperar más de un mes para obtener un mayor porcentaje de germinación de las semillas de capulín.

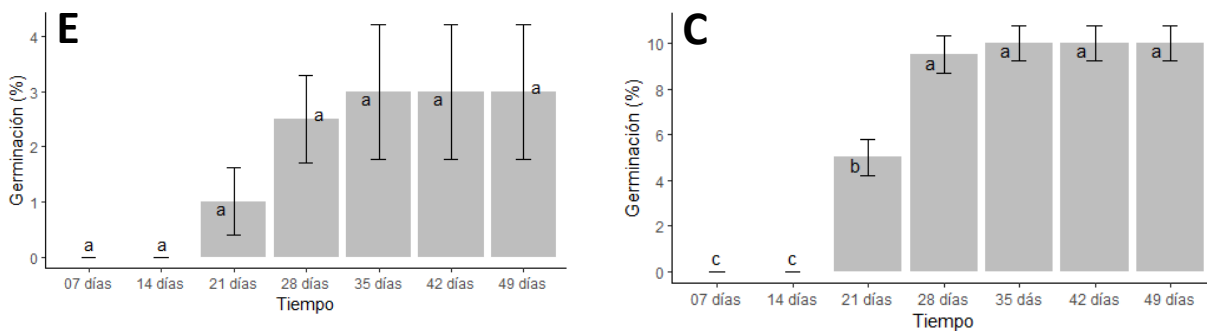


Figura 4. Comparación longitudinal de los tratamientos: Testigo con endocarpio (E) y ácido clorhídrico con endocarpio (C). Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos, con un nivel de significancia de, $\alpha=0.05$.

Al analizar los estimadores de los parámetros del modelo logístico para cada tratamiento, específicamente los estimadores de β y γ ; se observa que β representan el tiempo (días) en el que se alcanza la máxima tasa de germinación, mientras que γ indica cual tratamiento presentó la mayor tasa de germinación en ese tiempo.

Así entonces, los tratamientos B y D alcanzaron su máxima tasa de germinación casi al mismo tiempo, donde el tratamiento B lo logro a los 15.13 días (Cuadro 3), que resulta en un menor tiempo a lo reportado por Camacho (2021); sin embargo, el obtuvo un mayor porcentaje de germinación en 25.4 días. Con respecto al tratamiento D, este lo logro a los 16.70 días (Cuadro 3) lo que podría considerarse como un resultado optimo, debido a que tanto Pipinis et al. (2012) como Kim (2019) generaron un porcentaje de germinación del 48% en 13.30 días y del 29% en 11.4 semanas, respectivamente.

Para el resto de los tratamientos, aunque mostraron un porcentaje de germinación significativamente menor a lo largo del experimento (Figura 5), estos alcanzaron su máxima tasa de germinación a los 18 y 23 días (Cuadro 3), es decir, una semana más tarde que los tratamientos B y D.

Por otra parte, la máxima tasa de germinación para los mejores tratamientos (B y D) fueron diferentes; es decir, el tratamiento D con un $\gamma=11.81$, indica que en aproximadamente una semana se obtuvo el mayor porcentaje de germinación; mientras que, el tratamiento B con un $\gamma=6.27$, el tiempo para alcanzar el mayor porcentaje de germinación fue en aproximadamente dos semanas (Figura 5).

Cuadro 3. Estimadores de los parámetros del modelo logístico para cada tratamiento.

Tratamiento	α	β	γ
A	0.200331	21.465665	9.735933
B	0.541258	15.13802	6.273484
C	0.099988	21.011882	10.736707
D	0.500514	16.705126	11.816022
E	0.030332	22.972061	8.161513
F	0.288552	18.745667	11.032442

Análisis transversal del porcentaje de germinación

Por otra parte, al analizar los resultados del modelo mixto, se encontró que tanto los factores principales (Tratamientos y Tiempo) como la interacción entre ellos (tratamientos*tiempo) resultaron estadísticamente significativos con un $\alpha=0.05$. La significancia de la interacción ($p\text{-valor}=0.0001 < 0.05$) indica que las diferencias entre tratamientos no son consistentes a lo largo el tiempo. En otras palabras, el comportamiento del porcentaje de germinación varió a medida que transcurrió el tiempo.

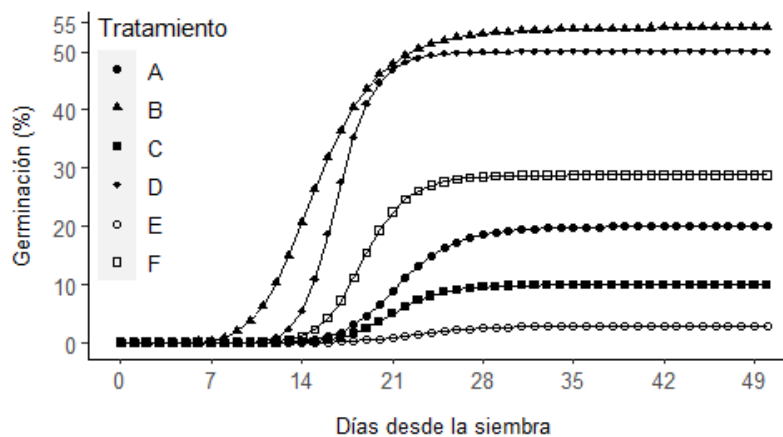


Figura 5. Comportamiento del porcentaje de germinación acumulado en el tiempo.

Comparación de tratamientos en la segunda semana

Dado que en la primera semana no se observó respuesta alguna, se excluyó del análisis. Así entonces, el comportamiento del porcentaje de germinación para cada tratamiento mostró diferentes patrones en el experimento. En la segunda semana, los tratamientos B, D y F alcanzaron porcentajes de germinación del 20.5%, 5.5% y 1%, respectivamente. McMahon et al. (2015) informaron que, en semillas escarificadas de *Prunus angustifolia* sin endocarpio, la germinación alcanzó el 33%, en solo dos semanas. Estos resultados coinciden con lo señalado por Szymajda et al. (2019), quienes concluyeron que la escarificación combinada con la eliminación del endocarpio de las semillas mejora la germinación. El resto de los tratamientos presentaron aun una respuesta nula (0%). Al comparar los tratamientos, se determinó que el mejor tratamiento fue el B (remojo/secado sin endocarpio); mientras que, el resto no presentaron diferencias estadísticas significativas (Figura 6, izquierda), el p-valor fue mayor a 0.05. Es importante señalar que a pesar de que los tratamientos D y F mostraron respuesta, no fue suficiente para concluir que existen diferencias estadísticamente significativas con los tratamientos A, C y E, que no presentaron respuesta (0%).

Comparación de tratamientos en la tercera semana

En la tercera semana, todos los tratamientos mostraron una respuesta, evidenciando un comportamiento y una tendencia que mantendrían hasta el final del experimento. Después de 21 días de la siembra, los tratamientos B y D alcanzaron los mayores porcentajes de germinación, con 48.5% y 47%, respectivamente; sin haber diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$). El tratamiento F, fue el segundo mejor, con un 22.5%, un porcentaje similar a lo reportado por Kim et al. (2021), quienes indicaron que, en semillas de *P. campanulata*, la eliminación del endocarpio aumento el porcentaje de germinación en un 25% en solo 21 días. En contraste, los tratamientos A, C y E, presentaron los menores porcentajes de germinación y no hubo diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) entre ellos (Figura 6, derecha). En cuanto a los tratamientos B y D, el error estándar (ee) fue mayor para el tratamiento D (ee=8.5); lo que sugiere que el tratamiento B fue más consistente en la respuesta al presentar un ee=5.1.

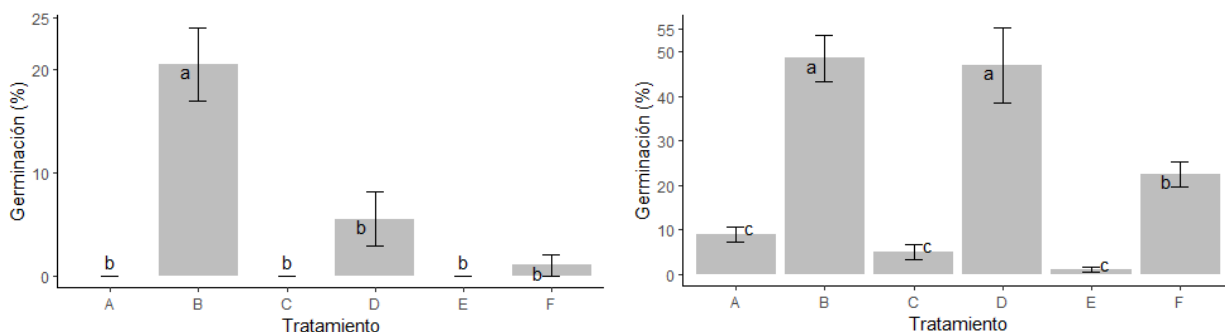


Figura 6. Porcentaje de germinación en la segunda (izquierda) y tercera (derecha) semana. Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tratamientos con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Comparación de tratamientos en la cuarta semana

Los porcentajes de germinación obtenidos hasta la cuarta semana evidenciaron cambios significativos en al menos dos tratamientos (A y C); los cuales duplicaron su porcentaje de germinación con respecto a la semana anterior, pasando de 9% a 18.5% y de 5% a 9.5%, respectivamente. De acuerdo a la comparación de los porcentajes promedio de germinación, se formaron tres grupos, (Figura 7, izquierda), el primer grupo estuvo conformado por los tratamientos B y D, que registraron los mayores porcentajes de germinación, valores similares a los reportados por Eşen et al., (2009) quienes informaron un porcentaje de germinación del 40% en semillas de *Prunus avium* obtenido en 28 días, tras usar agua desionizada como método de escarificación. El segundo grupo incluyó los tratamientos A y F que corresponden al remojo/secado con endocarpio y a las semillas sin endocarpio, respectivamente. Finalmente, el último grupo represento a los tratamientos C y E que registraron los porcentajes de germinación más bajos.

Comparación de tratamientos en la séptima semana

Como se mencionó al inicio de la sección de resultados y discusión, a partir de la semana cinco el porcentaje de germinación se mantuvo constante hasta finalizar el experimento, séptima semana. De los seis tratamientos, dos resultaron ser los mejores: remojo/secado con semillas sin endocarpio (B) y remojo con ácido clorhídrico con semillas sin endocarpio (D). Los segundos mejores tratamientos fueron remojo/secado con endocarpio y semillas sin endocarpio (F) y finalmente, el testigo (E) y el remojo en ácido clorhídrico resultaron ser los tratamientos con los menores porcentajes de germinación (Figura 7, derecha).

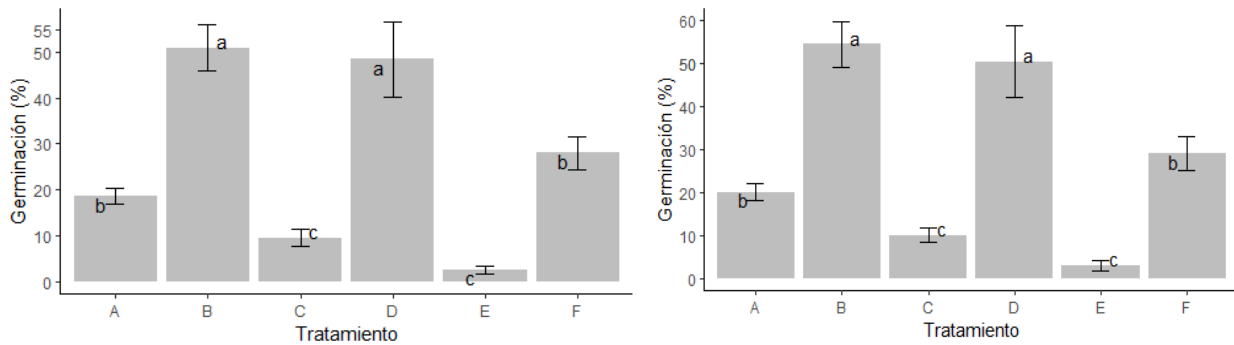


Figura 7. Porcentaje de germinación en la cuarta (izquierda) y quinta (derecha) semana. Las columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de tratamientos con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$

Conclusiones

Los resultados obtenidos de este estudio demostraron que el uso de métodos de escarificación en semillas de *Prunus serotina* puede acortar el tiempo de germinación, eliminando mecanismos inhibidores como la dormancia de la semilla y favoreciendo el porcentaje de germinación.

Los métodos de remojo/secado y la inmersión en ácido clorhídrico al 10% mostraron ser igualmente efectivos para acelerar la germinación de semillas de capulín, siempre y cuando el endocarpio sea retirado y la semilla no presente daños.

El análisis longitudinal mostró una interacción significativa entre el tiempo y los métodos de escarificación, indicando que la efectividad de los tratamientos varía a lo largo del tiempo. Los métodos son efectivos para romper la dormancia y aumentar el porcentaje de germinación, obteniendo plántulas en un menor tiempo. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para optimizar el manejo de las semillas en programas de producción de plantas.

Bibliografía

- Al-Absi, Khalid. (2010). The effects of different pre-sowing seed treatments on breaking the dormancy of mahaleb cherries, *Prunus mahaleb* L. Seeds. *Seed Science and Technology*, 38, 332-340. <https://doi.org/10.15258/sst.2010.38.2.06>
- Baskin, C., Baskin, J. (2014). *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination*. Second edition. Elsevier, San Diego. 1586 pp. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00597-X>
- Camacho Morfin, F. (2021). ELIMINACIÓN DE LA DORMICIÓN DE SEMILLAS DE CAPULÍN *Prunus serotina* ssp. *capuli* {Cav.}, MEDIANTE EL REMOJO Y SECADO. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 15(67), 63–74. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1126>
- Castillo-Quiroz, David & Antonio-Bautista, Adriana & Castillo, Francisco & Sáenz, J. & Sáenz-Reyes, J. (2021). Tratamientos pregerminativos para semillas de *Prunus cercocarpifolia* Villarreal (Rosales, Rosaceae), especie endémica de la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071003>
- Çetinbaş, M., & Koyuncu, F. (2006). Improving germination of *Prunus avium* L. seeds by gibberellic acid, potassium nitrate and thiourea. *Horticultural Science*, 33(3), 119-123. <https://doi.org/10.17221/3750-HORTSCI>
- Chen, S.-Y., Chien, C.-T., Chung, J.-D., Yang, Y.-S., & Kuo, S.-R. (2007). Dormancy-break and germination in seeds of *Prunus campanulata* (Rosaceae): role of covering layers and changes in concentration of abscisic acid and gibberellins. *Seed Science Research*, 17(1), 21–32. <https://doi.org/10.1017/S0960258507383190>
- Eşen, D., Güneş, N., & Yıldız, O. (2009). EFFECTS OF CITRIC ACID PRESOAKING AND STRATIFICATION ON GERMINATION BEHAVIOR OF PRUNUS AVIUM L. SEED. *Pakistan Journal of Botany*, 41, 2529-2535.
- Fresnedo-Ramírez, J., Segura, S. & Muratalla-Lúa, A. (2011). Morphovariability of capulín (*Prunus serótina* Ehrh.) in central-western region of Mexico from a plant genetic resources perspective. *Genet Resour Crop Evol* 58, 481-495. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9592-2>
- García-Gusano, M., Martínez-Gómez, P., & Dicenta, F. (2004). Breaking seed dormancy in almond (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb). *Scientia Horticulturae*, 99(3-4), 363-370. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.07.001>
- Ghayyad M, Kurbysa M, Napolsy G (2010). Effect of endocarp removal, gibberelline, stratification and sulfuric acid on germination of Mahaleb (*Prunus mahaleb* L.) seeds. *Am-Eur J Agric Environ Sci* 9(2):163-168. [https://idosi.org/aejaes/jaes9\(2\)/10.pdf](https://idosi.org/aejaes/jaes9(2)/10.pdf)
- Grisez TJ, Barbour JR, Karrfalt RP (2008). *Prunus* L. cherry, peach and plum, 875-890 p. In: Bonner FT, Karrfalt RP (Eds.). *Woody Plant Seed Manual*. Agriculture Handbook No. 727, USDA Forest Service, Washington, DC. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/wo/wo_ah727.pdf
- Guzmán, F. A., Segura-Ledesma, S. D., & Almaguer-Vargas, G. (2020). El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611866>
- Javanmard, T., Zamani, Z., Keshavarz Afshar, R., Hashemi, M., & Struik, P. C. (2014). Seed washing, exogenous application of gibberellic acid, and cold stratification enhance the germination of sweet cherry (*Prunus avium* L.) seed. *The Journal of*

- Horticultural Science and Biotechnology*, 89(1), 74–78.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513051>
- Jensen, M., & Kristiansen, K. (2009). Removal of distal part of cotyledons or soaking in bap overcomes embryonic dormancy in sour cherry. *Propagation of Ornamental Plants*, 9(3), 135-142. http://www.journal-pop.org/2009_9_3_135-142.htm
- Kim, D. H. (2018). Practical methods for rapid seed germination from seed coat-imposed dormancy of *Prunus yedoensis*. *Scientia Horticulturae*, 243, 451-456. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.039>
- Kim, GM, Ko, CH, Chung, JM, Kwon, HC, Rhie, YH y Lee, SY (2024). Clase de latencia de las semillas y características de germinación de *Prunus spachiana* (Lavallée ex Ed.Otto) Kitam. f. *ascendens* (Makino) Kitam, nativa de la península de Corea. *Plants*, 13 (4), 502. <https://doi.org/10.3390/plants13040502>
- Kumar, R., Misra, K. K., Misra, D. S. and Brijwal, M. (2012). Seed germination of fruit crops: a review. *HortFlora Research Spectrum*, 1(3): 199–207. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20123357598>
- McMahon, EA, Dunn, BL, Stafne, ET y Payton, M. (2015). Propagación por esquejes y semillas de ciruelo Chickasaw (*Prunus angustifolia*). *International Journal of Fruit Science*, 15 (3), 313–323. <https://doi.org/10.1080/15538362.2015.1009969>
- McVaugh, R. (1951). A revision of the North American black cherries (*Prunus serotina* Ehrh., and relatives). *Brittonia*, 7(4), 279-315. <https://doi.org/10.2307/2804698>
- Niembro Rocas, A., Vázquez Torres, M., & Sánchez Sánchez, O. (2010). Árboles de Veracruz: 100 especies para la reforestación estratégica (pp. 86-87). México: Gobierno del Estado de Veracruz. https://www.sev.gob.mx/servicios/publicaciones/colec_veracruzsigloXXI/ArbolesVeracruz100especies.pdf
- Pipinis, E., Milios, E., Mavrokordopoulou, O., Gkanatsiou, C., Aslanidou, M., & Smiris, P. (2012). Effect of Pretreatments on Seed Germination of *Prunus mahaleb* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 40(2), 183–189. <https://doi.org/10.15835/nbha4027887>
- Rohrer, J. R. (2014). *Prunus* (Rosaceae). In: Flora of North America Editorial Committee, Ed., Flora of North America North of Mexico, Vol. 9, Oxford University Press, New York, 363-365. http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=242417060
- Rzedowski, J., (2021). La familia Rosaceae en México. *Polibotánica*, (51), 1-16. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.1>
- Şan, B., Yildirim, A. N., & Yildirim, F. (2014). An In Vitro Germination Technique for Some Stone Fruit Species: the Embryo Isolated from Cotyledons Successfully Germinated without Cold Pre-treatment of Seeds. *HortScience horts*, 49(3), 294-296. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.3.294>
- Soriano, D., Huante, P., Gamboa-deBuen, A. et al. (2014). Effects of burial and storage on germination and seed reserves of 18 tree species in a tropical deciduous forest in Mexico. *Oecologia* 174(1): 33-44. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2753-1>
- Szymajda, M., Zurawicz, E., Maciorowski, R., & Prus, K. (2019). Stratification period combined with mechanical treatments increase *Prunus persica* and *Prunus armeniaca* seed germination. *Dendrobiology*, 81, 47-57. <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.081.006>

- Tewari, B., Tewari, A., Shah, S. *et al.* (2011). Physical attributes as indicator of seed maturity and germination enhancement in Himalayan Wild Cherry (*Prunus cerasoides* D. Don.). *New Forests* 41, 139–146. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9216-x>
- Toit du, H. J., Jacobs, G., & Strydom, D. K. (1979). Role of the Various Seed Parts in Peach Seed Dormancy and Initial Seedling Growth. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 104(4), 490-492. <https://doi.org/10.21273/JASHS.104.4.490>

CAPÍTULO IV. Impacto de la simbiosis micorrízica arbuscular en el desarrollo de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) en condiciones controladas¹

Eduardo González-Hernández¹, Elizabeth Hernández-Acosta^{2*}, Alejandro Corona-Ambríz¹, Ma. Amparo Máxima Borja-de la Rosa¹, Leopoldo Mohedano-Caballero¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: ehernandez@chapingo.mx

RESUMEN

El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) es un árbol frutal cuya presencia en su habitat natural ha disminuido considerablemente debido al poco interés que genera entre la población, a pesar de su gran potencial agroforestal y su importancia ecológica. Además, de enfrentar dificultades en su propagación y crecimiento, así como en el establecimiento de las plantas en campo, lo cual generalmente provoca su muerte en etapas tempranas. Con el fin de mitigar parcialmente esta problemática, se recomienda el uso de inóculos micorrízicos arbusculares, cuya función y efectividad ha sido probada en diferentes especies frutales y forestales. En el presente trabajo se evaluaron los efectos de dos inóculos comerciales (Tec-Myc® y Rizofermic®) de micorrizas arbusculares, un fertilizante químico y un testigo en el crecimiento y desarrollo de plántulas de capulín bajo condiciones controladas. Además, se evaluaron las variables morfológicas de altura de planta, diámetro del cuello de la raíz y número de hojas; el porcentaje de colonización micorrízica y cantidad de esporas. Asimismo, se determinó la calidad de planta, a través de cuatro índices. Finalmente, se obtuvo la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio (N, P, K) en las hojas de las plantas. Los resultados mostraron que las plantas inoculadas tuvieron valores más altos en las variables morfológicas y en el contenido de NPK con respecto a la Fertilización química. En cuanto a los índices de calidad estos revelaron que las plantas de capulín inoculadas presentaron una calidad media. Por lo tanto, se concluye que la aplicación de micorrizas arbusculares como biofertilizante en plantas de

capulín e incluso en otras especies forestales con el propósito de mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas e incrementar la sobrevivencia de las plantas en campo.

Palabras clave: *microorganismos benéficos, fertilización química, inoculación, macronutrientes, calidad de planta*

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Eduardo González Hernández

Director de Tesis: Dr. Alejandro Corona Ambriz

ABSTRACT

Impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on the development of capulin (*Prunus serotina* Ehrh.) under controlled conditions¹

The capulin (*Prunus serotina* Ehrh.) is a fruit tree whose presence in its natural habitat has significantly decreased due to the limited interest it generates among the population, despite its great agroforestry potential and ecological importance. In addition, it faces challenges in propagation and growth, as well as in the establishment of plants in the field, which often leads to their death in early stages. To help alleviate this issue, the use of arbuscular mycorrhizal inoculants is recommended, as their function and effectiveness have proven in various fruit and forest species. In the present study, the effects of two commercial arbuscular mycorrhizal inoculants (Tec-Myc® and Rizofermic®), a chemical fertilizer, and a control were evaluated on the growth and development of capulin seedlings under controlled conditions. Additionally, morphological variables such as plant height, root collar diameter, and leaf count were assessed, along with the percentage of mycorrhizal colonization and the spore density. Plant quality was also assessed using four indices. Finally, the amount of nitrogen, phosphorus, and potassium (N, P, K) in the plant leaves was determined. The results showed that the inoculated plants had higher values in the morphological variables and NPK content compared to the chemical fertilization. As for the quality indices, they revealed that the inoculated capulin plants showed an average quality. Therefore, the application of arbuscular mycorrhizal fungi is recommended as a biofertilizer for capulin plants and even other forest species, with the aim of improving plant growth and development, as well as increasing plant survival in the field.

Keywords: *beneficial microorganisms, chemical fertilization, inoculation, macronutrients, plant quality.*

¹Master's Thesis in Forest Sciences, Chaíngo Atonomous University

Author: Eduardo González Hernández

Thesis Advisor: Dr. Alejandro Corona Ambriz

Introducción

Las interacciones ecológicas entre diferentes especies pueden tener una aplicación práctica en la biotecnología vegetal en cultivos de interés agrícola y forestal (Sales et al., 2021; Barbosa et al., 2021). Los hongos micorrízicos participan en la simbiosis mutualista brindando algunas ventajas en el desarrollo de las plantas, desempeñando un papel crítico en nutrición, salud, así como en la calidad del suelo (Liu & Chen, 2024). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son biótrosos obligados que establecen asociaciones simbióticas con las raíces del 85% de las plantas vasculares, incluidos diversos cultivos agrícolas (Di Martino et al., 2019).

Los HMA mejoran la supervivencia de las plantas, incrementando la eficiencia del sistema radical en la absorción de nutrientes (Viera et al., 2016) y agua (Püschel et al., 2020), contribuyendo en la defensa contra patógenos fúngicos, bacterianos y nematodos (Yang et al., 2014); además, aporta tolerancia al estrés abiótico en plantas como la sequía, salinidad, cambios bruscos de temperatura y metales pesados (Chandrasekaran et al., 2021).

Por lo tanto los efectos positivos de los HMA se han demostrado en cultivos agroalimentarios como manzana (*Malus domestica* L.), ciruela (*Prunus domestica* L.), coco (*Cocos nucifera* L.), limón (*Citrus aurantifolia*), naranja agria (*Citrus aurantium* L.) y durazno (*Prunus persica* L.) (Wu et al., 2011), sin embargo, pocos son los estudios enfocados en explorar la funcionalidad de los HMA en la producción comercial de plantas con fines agrícolas, siendo un ejemplo alguno los árboles frutales (Alarcón et al., 2012).

El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) es un árbol frutal nativo de México, perteneciente a la familia de las Rosaceae, el cual es cultivado a pequeña escala en los estados de Puebla, Veracruz, Guerrero, Estado de México, Morelos y Michoacán (Fresnedo et al., 2011). Es una especie que, si bien su valor económico no es alto, su valor cultural y ecológico si lo es, promoviendo su cultivo y fomento en algunas comunidades rurales (Guzmán et al., 2020; Carrasco et al., 2023); esta especie es apreciada principalmente por su fruto, el cual es consumido en diferentes formas (fresco, licores, atoles, nieves, tamales y conservas) (Rodríguez y Farfán, 2014); considerado como un árbol multipropósito debido a que todo en él es aprovechado, desde su madera (Guzmán et al., 2020), sus

propiedades farmacológicas (Blancas et al., 2023) y usado como barrera protectora en las parcelas de cultivo (Avendaño-Gómez et al., 2015).

Sin embargo, el capulín tiene grandes retos en cuanto a su propagación, pues su cubierta leñosa (endocarpio) retarda en gran medida la germinación de sus semillas, así mismo el establecimiento de nuevos individuos en campo se ve afectado por las condiciones abióticas y bióticas presentes en la zona, dificultando su establecimiento y provocando su pérdida. Por ello, en la actualidad la biotecnología ofrece una alternativa para afrontar dicha problemática, una de ellas mediante el uso de microorganismos micorrízicos, siendo una alternativa mutualista benéfica aportándole a la planta mejoras en las características deseadas, además de otros beneficios (Aguirre-Medina & Aguirre-Cadena, 2022). El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos de la inoculación con dos tipos de inóculos micorrízicos arbusculares en el crecimiento y desarrollo de *Prunus serotina* bajo condiciones de invernadero.

Materiales y Métodos

Determinación de la micorriza en árboles de capulín crecidos en campo

Se realizó un muestreo de suelo en las raíces de cinco árboles de capulín (Figura 1); ubicados en la comunidad de Ocotepec, en el municipio de Ocotepec, Puebla, México (19°33'23'' latitud norte y 97°38'56'' longitud oeste, a una altitud promedio de 2440 msnm); aplicando un muestreo dirigido. Se tomaron cinco submuestras de suelo en la rizosfera de cada uno de los árboles seleccionados al azar, para conformar una muestra compuesta por árbol.

Se implementó la técnica descrita por Aguirre et al. (2007), que consiste en tomar 1 kg de suelo a una profundidad entre los 10 y 30 cm alrededor del área de goteo. Las muestras compuestas se almacenaron en bolsas plásticas para su transporte y se etiquetaron con los datos correspondientes. Se recolectó la mayor cantidad de raíces juveniles de los árboles de capulín. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en refrigeración a 5° C en Laboratorio de Biotecnología Ambiental del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

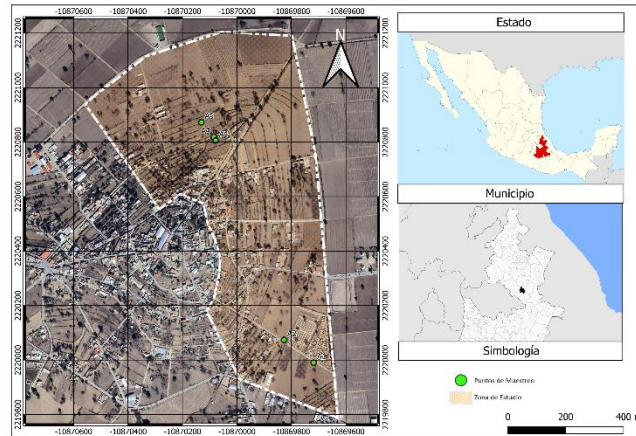


Figura 1. Zona de estudio y puntos de muestreo, realizados en Ocotepéc, Puebla.

Colonización micorrízica en raíces de árboles muestreados en campo

Se realizó la separación de las raíces juveniles de las muestras compuestas de cada uno de los árboles estudiados, utilizando la metodología de Phillips y Haymann (1970) (Figura 2), para visualizar las estructuras internas presentes en las raíces de los árboles de capulín. Se recolectaron 100 fragmentos de raíz de aproximadamente 1 cm de largo, los cuales fueron lavados con agua corriente.

Posteriormente, los fragmentos de raíz se sumergieron en hidróxido de potasio (KOH) al 10% durante 20 minutos, y luego fueron lavadas con agua corriente; seguidamente se sumergieron en peróxido de hidrogeno al 10% por 10 minutos, transcurrido el tiempo se volvieron a lavar con agua corriente, colocándolas en ácido clorhídrico (HCl) al 10% por cinco minutos. Finalmente, se desechó el HCl y se adicionó el azul de tripano al 0.05%, por un periodo de 40 minutos.

Se colocaron 20 fragmentos de raíces en un portaobjetos, replicando el procedimiento en cinco ocasiones para las raíces de cada árbol. Con ayuda de un microscopio óptico se evaluó la colonización por hongos micorrizicos de cada raíz, siguiendo un trayecto a través de tres pasajes equidistantes en la laminilla. Asignando el valor de 1 cuando se observa un segmento de raíz que contenga hifas, vesículas y/o arbuscúlos. El porcentaje de colonización se obtuvo mediante la división de los segmentos colonizados entre los segmentos totales por cien.

$$\text{Porcentaje de colonización total} = \frac{\text{número de segmentos colonizados}}{\text{número de segmentos totales}} \times 100$$



Figura 2. Tinción de raíces de capulín. a) almacenamiento en solución FAA. b) soluciones para la tinción: 1. peróxido de sodio, 2. ácido clorhídrico al 10%, 3. azul de tripano 0.05% y 4. ácido láctico. c) laminas con fragmento de raíz teñidos

Aislamiento e identificación de esporas de árboles muestreados en campo

La extracción de esporas del suelo se realizó mediante la metodología de Gerdemann y Nicolson (1963). Se pesaron tres submuestras de 100 g de las muestras compuestas de cada uno de los árboles. Las muestras de suelo fueron colocadas en contenedores plásticos de 2 L con agua corriente; agitándolos mecánicamente (MS-1 Digital Shaker a 180 rpm) durante cinco minutos, y dejándolas reposar por tres minutos. El sobrenadante se filtró a través de tamices de 63, 37 y 44 micras (μm) apilados en ese orden, repitiendo el procedimiento tres veces más. El contenido del tamiz de 44 μm fue depositado en tubos de centrifuga de 50 ml, para posteriormente, verter el contenido en una caja petri con un papel filtro cuadrículado (0.5 X 0.5 mm). Finalmente, con ayuda de un estereoscopio (Velab VE-S4) se determinó el número de esporas presentes por cada 100 g de suelo (Figura 3).

De igual forma, se agruparon las esporas según sus características morfológicas, como: color, forma y tamaño. Se prepararon laminillas (cinco esporas por laminilla) con las esporas de mayor presencia de cada uno de los árboles, agregando una gota de reactivo de Melzer (tinción), dejando reposar hasta que el reactivo secase. Posteriormente, con un microscopio óptico (Leica DM500), se observaron las estructuras externas e internas de las esporas. Los resultados fueron comparados con las claves taxonómicas del International Culture Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM) (2018).



Figura 3. Filtrado de esporas y cuantificación.

Con la identificación de la colonización micorrízica y la caracterización de las esporas en los árboles de capulín crecidos en campo, nos permitió seleccionar de forma segura los inóculos micorrízicos comerciales que fueron utilizados en la inoculación de plántulas de capulín obtenidas a partir de semillas, bajo condiciones de invernadero para evaluar los efectos en el crecimiento y desarrollo de la planta, en comparación con un fertilizante químico.

Inoculación micorrízica y fertilización química en plántulas de capulín en condiciones de invernadero

La inoculación con micorrizas se realizó en condiciones de invernadero utilizando dos inóculos comerciales previamente seleccionados por su contenido de esporas (Cuadro 1); utilizando plántulas de capulín con una longitud aproximada de 4 cm.

Cuadro 1. Contenido de los inóculos comerciales.

Inóculo	Contenido de especies
Tec-Myc®	<i>Glomus fasciculatum</i> , <i>G. constrictum</i> , <i>G. tortuosum</i> , <i>G. geosporum</i> , <i>Acaulospora scrobiculata</i> y <i>Gigaspora margarita</i> .
Rizofermic®	<i>Acaulospora morrowiae</i> , <i>A. spinosa</i> , <i>A. scrobiculata</i> , <i>Funneliformis mosseae</i> , <i>F. geosporus</i> , <i>Gigaspora rosea</i> , <i>Gigaspora decipiens</i> , <i>Glomus macrocarpum</i> , <i>G. aggregatum</i> y <i>Rhizophagus intraradices</i> .

La inoculación planta-micorriza se realizó en bolsas negras de polietileno (20 X 20 cm) con una mezcla de sustrato de peat moss, agrolita y tierra negra (relación 1:1:1). El sustrato fue esterilizado en una cámara de luz ultravioleta (UV) durante 10 minutos. Posteriormente, el cepellón de las plántulas fue espolvoreado con 7 g de un único inoculante por planta, repitiendo el proceso para cada inoculante (Figura 4).

La aplicación del fertilizante químico se realizó aplicando un producto comercial soluble rico en nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), con una concentración de 20-20-20 ppm. Siguiendo las indicaciones del fabricante, se disolvieron 10 g del fertilizante en 2 L de agua corriente. Las fertilizaciones posteriores se realizaron de forma mensual. Las plántulas inoculadas y las fertilizadas químicamente se mantuvieron en condiciones de invernadero con 30% sombra, a una temperatura de 28° C durante el día y 16° C por la noche, y con una humedad relativa del 60% a lo largo de los cuatro meses que duró el experimento.

Durante los primeros dos meses, se regó con agua corriente tres veces por semana, posteriormente, en los últimos dos meses, el riego se redujo a dos veces por semana. Transcurridos 30 días de la inoculación y fertilización, se evaluaron diferentes variables morfológicas, porcentaje de colonización micorrízica, conteo de esporas, calidad de la planta y el contenido de nutrientes presentes en las hojas de la planta (N, P, K).



Figura 4. Inoculación y trasplante de plántulas de capulín.

Variables morfológicas

Después de que las plántulas cumplieran un mes desde la inoculación y fertilización, se seleccionaron al azar cinco plantas de cada tratamiento para medir las siguientes características morfológicas: altura de la planta (cm); se midió con una regla graduada en centímetros, desde el cuello de la raíz hasta la punta de la yema apical, diámetro a la basa del tallo (mm); se obtuvo con un vernier (Mitutoyo 505-637-50), número de hojas; se contabilizaron solo las hojas que presentaran un crecimiento pleno.

Para determinar el peso fresco de cada parte de la planta, se retiraron las hojas del tallo, se realizó un corte para separar la raíz del tallo y se pesaron por separado en una balanza analítica (OHAUS Pioneer PA114). Este proceso se repitió para todas las plantas elegidas al azar, obteniendo así el peso fresco total (Figura 5).

Para determinar el peso seco, una vez obtenido el peso fresco de las partes aéreas y de las raíces, cada parte fue colocada en charolas de aluminio con su respectiva información (tratamiento y repetición) y se deshidrataron en un horno (Kinet-53874) a 70° C durante 72 horas. Posteriormente, se pesaron en una balanza analítica. Cabe mencionar que esta metodología se repitió una vez al mes, seleccionando el mismo número de plantas al azar durante toda la duración del experimento.

Índices morfológicos

Índice de esbeltez (*IE*) o Coeficiente de esbeltez (*CE*). Este índice relaciona la altura (cm) y el diámetro del cuello de la raíz (mm) de la planta (Duryea, 1985), y se determina de la siguiente manera:

$$IE = \frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}}$$

Los valores entre 5 y 10 indican una buena relación entre la altura y el diámetro del cuello, lo que indica una planta de buena calidad. Por otro lado, valores mayores a 10 indican una planta muy alta en relación con el diámetro del cuello, mientras que valores inferiores a 5 señalan una planta pequeña en comparación con el diámetro del cuello (Quiroz et al., 2009).

Índice de lignificación (*IL*). El cual se encarga de proporcionar una estimación del grado de robustez de la planta, necesario para tolerar el estrés, como el hídrico (Prieto et al., 2009), consistió en determinar el porcentaje de peso seco con relación al contenido de agua en las plantas:

$$IL = \frac{\text{Masa total seca (g)}}{\text{Masa total húmeda (g)}} \times 100$$

Índice tallo/raíz (*ITR*). Se caracteriza por reflejar el desarrollo de la planta, siendo la biomasa seca aérea entre la biomasa seca de la raíz:

$$ITR = \frac{\text{Biomasa seca aérea (g)}}{\text{Biomasa seca raíz (g)}}$$

Índice de calidad de Dickson (*ICD*). Expresa el equilibrio de la distribución de la masa y la robustez, evitando seleccionar plantas desproporcionadas, donde valores superiores a 0.5 representan una alta calidad de planta, mientras valores inferiores a 0.2 indican una calidad baja, y aquellos entre 0.2 y 0.4 se consideran calidad media (Dickson et al., 1960; Prieto et al., 2009 y Sáenz et al., 2014) y se determina de la siguiente manera:

$$ICD = \frac{\text{Masa seca total}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Masa seca aérea (g)}}{\text{Peso seco de raíz (g)}}}$$

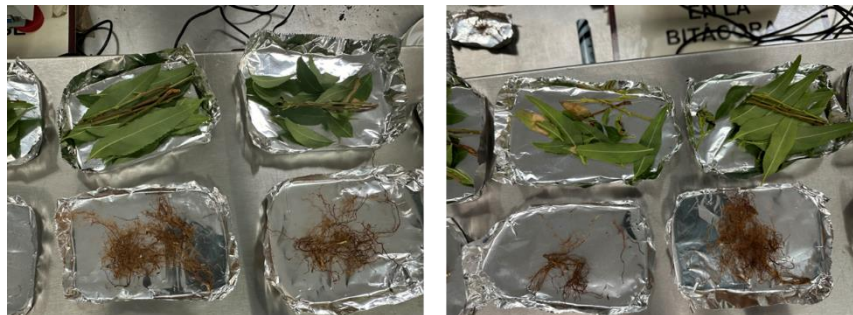


Figura 5. Biomasa fresca y Biomasa seca de plantas de capulín.

Análisis filiares en plantas de capulín

Para determinar el contenido nutricional (NPK) foliar de las plantas de capulín, se prepararon las muestras antes de ingresarlas al laboratorio. Se seleccionaron las hojas obtenidas en el último pesaje de peso seco, las cuales fueron trituradas cuidadosamente

con un mortero hasta obtener un polvo lo más fino posible. Esto se repitió con las hojas de dos plantas adicionales por cada tratamiento, con el fin de asegurar la representatividad de las muestras. Una vez preparadas, las muestras fueron ingresadas al laboratorio nacional de investigación y servicio agroalimentario y forestal (LANISAF), de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se realizaron los análisis químicos para determinar los niveles de NPK en las hojas de las plantas de capulín.

Diseño experimental, tratamientos y análisis estadístico

El diseño experimental debido a que las plantas estuvieron bajo condiciones de invernadero, y 32 repeticiones para cada uno de los cuatro tratamientos. Los tratamientos consistieron en los dos inóculos comerciales (Tec-Myc[®], Rizofermic[®]), una fertilización química (20-20-20) y un testigo.

Para realizar el análisis de las variables morfológicas (altura, diámetro y número de hojas) se realizará un análisis de varianza para determinar la existencia de efectos de tratamiento y en caso de existir, llevar a cabo una comparación de medias, con el método de Tukey, para determinar que tratamiento son iguales o diferentes. Cabe mencionar, que para el caso de la variable número de hojas se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis por ser una variable discreta. Con respecto al análisis nutrimental foliar, nuevamente se consideró un diseño completamente y el método de Tukey para determinar la existencia de diferencias entre los efectos de los tratamientos. Por último, el análisis estadístico se realizó con el Software R (R Core Team, 2023).

El modelo estadístico para analizar los datos de un diseño completamente al azar es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}; \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2), i = 1, 2, \dots, t; j = 1, 2, \dots, r.$$

Donde:

Y: Variable respuesta en la j-ésima repetición (r) con el i-ésimo tratamiento (t).

τ_i : Efecto del i-ésimo tratamiento.

ε_{ij} : Error aleatorio correspondiente a la j-ésima repetición (r) con el i-ésimo tratamiento (t)

Resultados y discusión

Colonización micorrízica y caracterización de esporas en árboles de capulín crecidos en campo

En las muestras de suelo analizadas, específicamente, en las raíces de los árboles se observaron diversas estructuras internas; las cuales están asociadas a las micorrizas arbusculares: hifas, vesículas y arbuscúlos (Figura 6a) (Carrillo-Saucedo et al., 2022). La colonización de las raíces por hongos micorrizicos arbusculares (HMA) presentó diferencias significativas entre los árboles muestreados (Figura 7a). Las raíces procedentes del árbol 5 mostraron una colonización del 26.62% siendo la más alta entre todos los árboles estudiados.

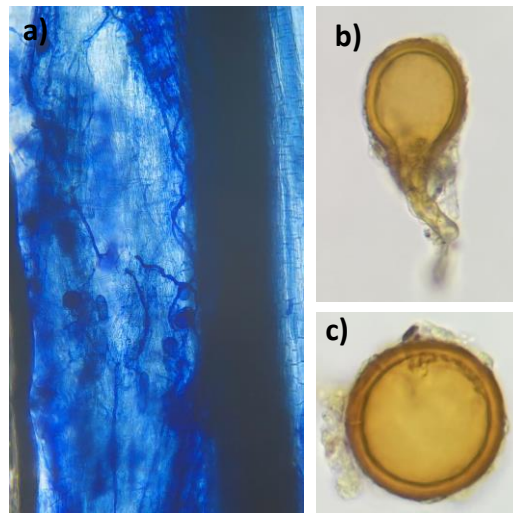


Figura 6. Identificación de estructuras micorrizicas en árboles de capulín a) hifas y vesículas, b) espora con hifa conectada y c) estrato.

Por otra parte, los árboles del 1 al 3, registraron un porcentaje similar de colonización en sus raíces, entre 15.96%, 17.13% y 14.96%, respectivamente, el árbol 4 presento un porcentaje por debajo de los otros tratamientos, alcanzando un 10.62% de colonización. Este resultado podría estar relacionado con la ubicación de estos árboles, ya que se encuentran en parcelas agrícolas donde se tiene registro del uso de fertilizantes químicos. Según Nieder et al. (2018), el uso de pesticidas y fertilizantes puede alterar las propiedades del suelo.

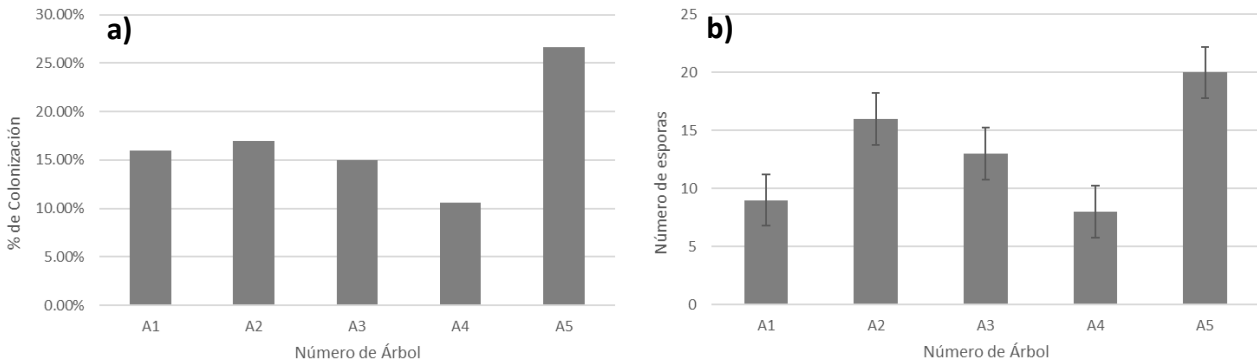


Figura 7. Evaluación micorrízica en arboles de capulín, a) colonización micorrízica en raíces y b) cantidad de esporas en suelo.

pertenecen al grupo de las Glomoides del género *Glomus* sp., el cual fue encontrado en los cinco árboles estudiados. En consecuencia, se concluye que los árboles de capulín establecen una simbiosis con las micorrizas arbusculares del género *Glomus* sp. Esto se ve respaldado por Brundrett y Tedersoo (2020), quienes afirman que las especies *Prunus* solo se relacionan con las micorrizas arbusculares. Con base a la información obtenida en el apartado, se pudo seleccionar los inóculos micorrizicos comerciales cuyo contenido de esporas estuviera compuesto principalmente por el género *Glomus* sp.

Efectos de la inoculación y fertilización en el crecimiento y desarrollo en plántulas de capulín

a) Altura de la planta

Al evaluar la altura de las plantas se observó que existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Figura 8). La inoculación con Tec-Myc® dio como resultado plantas de mayor altura, una altura promedio de 42.85 cm, esto con respecto al resto de tratamientos. Bi et al. (2021) inoculó con HMA plántulas de *Prunus sibirica* L., reportando que los HMA ejercieron un efecto positivo sobre el crecimiento de las plántulas. El Rizofermic y la Fertilización química (FQ) no mostraron una diferencia significativa entre sí, alcanzando alturas promedio de 25.79 y 26.83 cm, respectivamente. El Testigo mostró plantas con menor altura, siendo notablemente las plantas más pequeñas con una altura promedio de 12.84 cm.

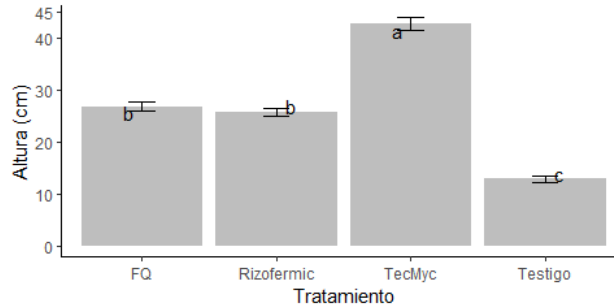


Figura 8. Altura de plantas de capulín. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas, $\alpha=0.05$.

b) Diámetro del cuello de la raíz

En relación con el diámetro del cuello de la raíz, se observó una diferencia significativa entre tratamientos (Figura 4a); donde el Tec-Myc® mostró un mayor diámetro del cuello, alcanzando 3.12 mm en promedio. Feldmane et al. (2021) reportaron un aumento en un 10.99% en el diámetro del cuello de la raíz en portainjertos del género *Prunus* sp. inoculados con HMA (*Rhizophagus irregularis*). La Fertilización química (FQ) fue el segundo mejor tratamiento con un diámetro promedio de 2.54 mm. En el caso de Rizofermic®, el diámetro promedio del cuello fue de 2.13 mm, con un valor por debajo del primer inóculo micorrízico. Finalmente, el testigo presentó un diámetro menor al resto de tratamientos, con un valor promedio de 1.76 mm.

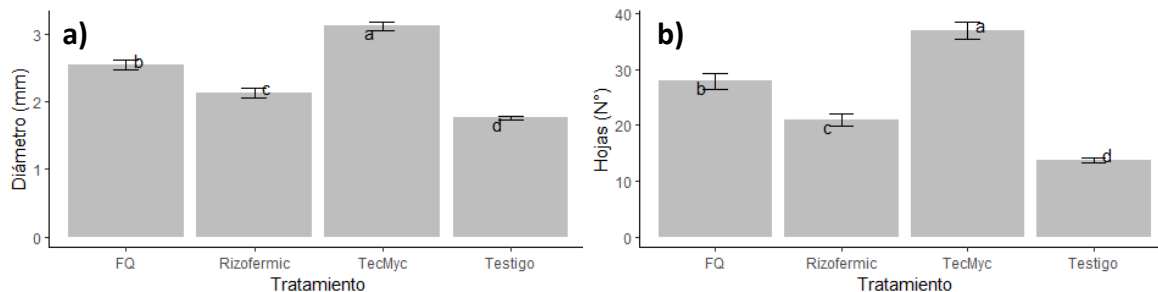


Figura 9. a) diámetro del cuello de la raíz y b) número de hojas. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas $\alpha=0.05$.

c) Número de hojas

Se observó que el número de hojas (Figura 4b) presento un comportamiento similar a la variable altura y diámetro; es decir, con el Tec-Myc® se obtuvo la mayor cantidad de hojas

por planta, 36.94 en promedio; mientras que, la Fertilización química (FQ) mostró un promedio de 27.85. Por otra parte, el Rizofermic® mantuvo un promedio cercano a las 20 hojas por planta. Y repitiendo la misma tendencia, el testigo mostró el menor número promedio hojas con respecto al resto de tratamientos, con aproximadamente 14 hojas por planta. Así entonces, el testigo siempre presentó los valores más bajos en las variables evaluadas (altura, diámetro y hojas). En este sentido, Feldmane et al. (2021) reportaron que uno de los portainjertos inoculado con *R. irregularis* supero en el número de hojas a las plantas control, con un rango de 15 a 22 hojas frente a las 4 a 15 hojas del control.

Porcentaje de colonización micorrízica en plantas de capulín, inoculadas con dos inóculos micorrízicos y fertilizadas

Con respecto al porcentaje de colonización, la inoculación dio evidencia de que es posible obtener una colonización aceptable en las raíces de las plantas de capulín con una aplicación de 7 g de inóculo. El inóculo Tec-Myc® alcanzó un porcentaje máximo promedio 49.57% en el mes de mayo; mientras que, el Rizofermic® logró un máximo del 45.04% en el mes de junio. Estos valores pueden compararse con lo reportado por Feldmane et al. (2021), quienes alcanzaron un porcentaje de colonización del 66.67% al inocular portainjertos del género *Prunus* sp. con 100 esporas y Bi et al. (2021) obtuvo valores entre 40 y 60% de colonización usando 100 g de inóculo (*Funneliformis mosseae*). Por otra parte, se observó que el inóculo Rizofermic® mantuvo una colonización creciente a través del tiempo; en contraste, el Tec-Myc® su colonización disminuyó al final del experimento (Cuadro 2). La comparación de los resultados permite determinar el efecto positivo de la aplicación del inóculo, debido a que un nivel de colonización entre el 30% y el 50% se considera adecuada (Carrillo-Saucedo et al., 2022); por consecuencia, para aumentar el porcentaje de colonización se sugiere incrementar las esporas en la inoculación.

a)

Cuadro 2. Efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en plantas de capulín.

Inóculo	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Tec-Myc	20.04 (4.4) a	49.28 (0.74) a	49.57 (1.6) a	44.24 (2.4) a
Rizofermic	6.84 (1.3) b	27.70 (2.3) b	41.57 (1.1) b	45.05 (1.3) a

b)

Inóculo	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Tec-Myc	19 (2.91) a	14 (2.6) a	39.6 (3.06) a	45.6 (5.9) a
Rizofermic	7.8 (1.43) b	10.20 (1.24) a	17.2 (2.76) b	20.0 (2.92) b

(ee): Error estándar; a) Porcentaje de colonización durante cuatro meses y b) Número de esporas desde la inoculación.

Con respecto al número de esporas (Cuadro 2b). Al inicio del experimento (febrero, 2024), el inóculo Tec-Myc® contenía 36 esporas en 7 g; mientras que, el Rizofermic® tenía 16 en la misma cantidad de inóculo. Después de dos meses de la inoculación, el Tec-Myc® experimento una disminución al pasar de 36 a 14 en el tercer mes; mientras que, el Rizofermic® aumentó significativamente al pasar de 7.8 a 20 esporas en promedio en el mes de junio. Lo anterior implica que a pesar de utilizar una cantidad reducida de esporas se logra un efecto positivo en la simbiosis micorriza-raíces. Tal como lo demostró Meddich et al. (2021) y Marín Cuevas et al. (2023) al aplicar 44 y 30 esporas para inocular plantas de *C. melo* y *O. pyramidale*, respectivamente; obteniendo un aumento de la biomasa, raíces y en las características fenotípicas. Por otra parte, Haghighi et al. (2017) destacaron la importancia de la densidad de esporas en un experimento con plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) con densidades de 1×10^3 y 2×10^3 . Con la primera densidad solo aumentó la biomasa de raíces y la parte aérea; mientras, la segunda densidad mejoró tanto la biomasa de raíces como el peso de los frutos.

Calidad de la planta inoculada y fertilizada

La evaluación de calidad de planta se realizó a través de los índices: Dickson (ICD), Esbeltez (IE), Lignificación (IL) e índice de relación Tallo/Raíz (ITR). Los resultados obtenidos se presentan el Cuadro 3. Con respecto al índice de esbeltez (IE), el inóculo micorrízico Tec-Myc® obtuvo el valor más alto, lo cual implicó en obtener plantas más altas con respecto al resto de tratamientos. Según Bartlett et al. (2012) ciertos rasgos en la relación altura-diámetro, diámetro del tallo y en el área foliar puede verse afectada por condiciones de estrés. En contraste, el resto de los tratamientos mostraron valores que los identifican con una buena calidad de planta según el estudio realizado por Quiroz et al. (2009).

Cuadro 3. Valores promedio de plantas de capulín sujetas a las condiciones de invernadero.

Tratamiento	Índices de Calidad			
	IE (ee)	IL (ee)	ITR (ee)	ICD (ee)
Tec-Myc	12.12 (0.57)	27.80 (0.93)	2.70 (0.29)	0.38 (0.009)
F. Química	9.16 (0.59)	33.93 (3.98)	2.44 (0.43)	0.35 (0.098)
Rizofermic	9.01 (0.46)	26.62 (0.44)	3.82 (0.79)	0.13 (0.027)
Testigo	6.51 (0.89)	24.86 (2.26)	2.68 (0.47)	0.12 (0.028)

IE = Índice de Esbeltez; IL = Índice de Lignificación; ITR = Índice de relación Tallo/Raíz; ICD = Índice de Calidad de Dickson; (ee): Error estándar.

En cuanto al índice de lignificación (IL), se encontró que con la Fertilización química se obtuvo el mayor valor (Cuadro 3) superando al resto de los tratamientos; lo anterior es favorable debido a que un alto contenido de lignina beneficia la robustez estructural y resistencia a diferentes condiciones de estrés (Renault et al., 2019). En relación a los inóculos micorrizicos, estos mostraron valores similares, pero inferiores al Tec-Myc® (Cuadro 3). Por último, el valor del testigo fue el más bajo de los tratamientos.

Con respecto al índice de la relación tallo/raíz, el Rizofermic® mostró el valor más alto; mientras que, el resto de tratamientos mostraron valores menores y semejantes, donde entre más estrecha sea la relación (tallo/raíz) mayor será su supervivencia en condiciones no controladas, es decir, que su sistema radicular este más desarrollado en comparación con la parte aérea (Quiroz et al., 2009) mejorando la capacidad de la planta para adaptarse y sobrevivir a entornos no controlados. Según lo descrito por González et al. (2012) y Martínez et al. (2015) indican que plántulas con mayor biomasa radicular sobreviven mejor y se desempeñan eficientemente bajo estrés.

Finalmente, de acuerdo a los resultados se tiene que con el inóculo Tec-Myc® y la fertilización química se obtuvieron los mayores índices de calidad de Dickson, 0.38 y 0.35, respectivamente (Cuadro 3). Tales tratamientos se clasifican con una calidad media de las plantas. De igual forma, Rizofermic® y el testigo compartieron valores semejantes (0.13 y 0.12), lo que las clasifica como plantas de baja calidad, con una capacidad limitada de supervivencia al trasplante en condiciones no controladas.

Análisis foliar

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos sobre el contenido de los macro nutrientes presentes en las hojas de capulín, revelaron una diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$) en el contenido de N, P y K entre los tratamientos (Cuadro 4). Con relación al nitrógeno, los inóculos micorrízicos (Tec-Myc® y Rizofermic®) fueron estadísticamente superiores a los tratamientos con fertilización química y el testigo, alcanzando un promedio de aproximadamente 32,000 y 27,000 mg/kg, respectivamente. Zai et al. (2021) reportaron que las plantas de *Prunus marítima* inoculadas con HMA mejoraron significativamente las concentraciones de N independientemente de las condiciones salinas a las que fueron sometidas las plantas. En contraste, el testigo fue superior al contenido registrado por la fertilización química; la cual mostró un contenido bajo de N, a diferencia del resto de los tratamientos.

En cuanto al contenido de fósforo (P), los tratamientos Tec-Myc® y la Fertilización química presentaron los mayores contenidos de fósforo, sin mostrar diferencia estadística significativa. Lotfi et al. (2019) concluyeron que los HMA influyen positivamente en la acumulación de P y Zn; los cuales favorecen el desarrollo y la capacidad de las plantas para la absorción de nutrientes. En el caso del testigo, éste mostró un contenido promedio superior al Rizofermic® debido a que su media fue estadísticamente inferior al registrado por el testigo (Cuadro 4). Lo anterior podría derivar en plantas con deficiencias para su crecimiento, establecimiento en campo y una menor resistencia a diferentes condiciones de estrés. Según Bañuelos et al. (2017) y Al-Mharib et al. (2019) las concentraciones de fósforo influyen directamente en el crecimiento de las plantas y favorecen el crecimiento vegetal.

Cuadro 4. Análisis nutrimental foliar en plantas de capulín.

Tratamientos	Macronutrientes (mg/kg)		
	Nitrógeno (ee)	Fósforo (ee)	Potasio (ee)
Tec-Myc	32605.0 (382) a	1791.16 (13.6) a	1966.67 (14.4) a
F. Química	26021.6 (363) c	1748.70 (8.7) a	1647.22 (20.0) b
Rizofermic	32771.6 (83.3) a	1448.87 (18.5) c	1536.11 (10.0) c
Testigo	27355.0 (144) b	1565.95 (19.9) b	1386.11 (7.4) d

Tratamientos con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas con un $\alpha= 0.05$. (ee): Error estándar.

Finalmente, los resultados obtenidos sobre el contenido de potasio mostraron diferencias significativas entre todos los tratamientos con un $\alpha=0.05$, (Cuadro 2). El contenido promedio más alto lo presentó el Tec-Myc® (1966.67 mg/kg), el segundo fue la fertilización química con un promedio de 1647.22 mg/kg. El Tec-Myc® mostró el contenido de potasio más alto y, además, fue el tratamiento que mostró el mayor contenido de nitrógeno y potasio en las hojas de capulín.

Esto se respalda con el trabajo de Al-Karaki et al. (2021), quienes concluyeron que hubo una mayor concentración de macronutrientes (N, P y K) en hojas de plantas inoculadas con un consorcio micorrízico. Asimismo, Bi et al. (2021) obtuvieron resultados cuyas fracciones másicas de N, P y K de plántulas de *P. sibirica* L. micorrizadas fueron superiores a las plantas no micorrizadas. Para los otros tratamientos (Fertilización química, Rizofermic y testigo) se observó que la Fertilización química fue la segunda mejor opción al registrar una concentración promedio de 1647.22 mg/kg; mientras que, el Rizofermic® mostró un contenido de 1536.11 mg/kg. Por último, el testigo mostró el contenido de potasio más bajo de todos los tratamientos; sin embargo, este tratamiento supero a la fertilización química y el Rizofermic en el contenido de nitrógeno y fósforo, respectivamente.

Conclusiones

Las micorrizas arbusculares son microorganismos simbióticos que se encuentran en una relación benéfica con las raíces de los árboles de capulín.

La inoculación con micorrizas arbusculares en plántulas de capulín mejoro notablemente su crecimiento y desarrollo en condiciones de invernadero, superando los efectos de la fertilización química.

Los índices de calidad señalaron que las plantas de capulín inoculadas con micorrizas arbusculares, tendrán una mejor adaptabilidad al trasplante en condiciones de campo; siendo una alternativa de ecológica, eficiente y económica.

Aunque los fertilizantes químicos lograr promover el crecimiento y desarrollo de las plantas en un periodo corto, sus beneficios van desvaneciéndose rápidamente. En cambio, las micorrizas arbusculares una vez establecidas en las raíces, sus beneficios se prolongan durante todo el ciclo de desarrollo de la planta.

La inoculación con micorrizas arbusculares mejoro la absorción de nutrientes de NPK en comparación con plantas fertilizadas químicamente.

Bibliografía

- Aguirre JF., Irizar MB., Grajeda OA., Peña MA., Loredó C. y Gutiérrez A. (2009). Los biofertilizantes microbianos: alternativa para la agricultura en México. Folleto Técnico Núm. 5 Tuxtla Chico, Chiapas. Marzo 2009. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur Campo Experimental Rosario Izapa.
- Aguirre-Medina, J. F., & Aguirre-Cadena, J. F. (2022). Endomicorriza: su aplicación en la agricultura, *Agro-Divulgación*, 2(1). Recuperado a partir de <https://agrodivulgacion-colpos.org/index.php/1agrodivulgacion1/article/view/48>
- Alarcón A, Hernández-Cuevas LV, Ferrera-Cerrato R, Franco-Ramírez A (2012) Diversity and Agricultural Applications of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Mexico. *J Biofertil Biopestici* 3:115. <https://doi.org/10.4172/2155-6202.1000115>
- Al-Karaki, G. N., y Williams, M. (2021). Mycorrhizal mixtures affect the growth, nutrition, y physiological responses of soybean to water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(5), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03250-0>
- Al-Mharib, M. Z., A. M. Attalah, and A. B. Ali. (2019). Effect of adding humic acid and phosphate fertilizer levels on growth and yield of lettuce. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 12(4), 12-15. <https://doi.org/10.9790/2380-1204011215>
- Avendaño-Gómez, A., R. Lira-Saade, B. Madrigal-Calle, E. García-Moya, M. Soto-Hernández y A. Romo de Vivar-Romo. (2015). Management and domestication syndromes of capulin (*Prunus serotina* Ehrh ssp. *capuli* (Cav.) McVaugh) in communities of the state of Tlaxcala. *Agrociencia* 49(2): 189-204. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1140>
- Bañuelos, J., C. W. Sangabriel., M. E. Gavito., A. D. Trejo., S. Camara., O. R. Mendel, and Y. A. Carreon. (2017). Effect of different phosphorus levels on avocado inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas*, 8(7), 1509-1520. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.507>
- Barbosa, L.S., de Souza, T.A.F., de Oliveira Lucena, E., da Silva, L. J. R., Laurindo, L. K., dos Santos Nascimento, G., y Santos, D. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi diversity and transpiratory rate in long-term field cover crop systems from tropical ecosystem, northeastern Brazil. *Symbiosis* 85(2), 207–216. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00805-0>
- Bartlett, M.K., Scoffoni, C., Ardy, R., Zhang, Y., Sun, S., Cao, K., and Sack, L. (2012). Rapid determination of comparative drought tolerance traits: using an osmometer to predict turgor loss point. *Methods Ecol. Evol.* 3(5): 880–888. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00230.x>

- Bi, Y., Xie, L., Wang, Z. et al. (2021). Arbuscular mycorrhizal symbiosis facilitates apricot seedling (*Prunus sibirica* L.) growth and photosynthesis in northwest China. *Int J Coal Sci Technol* 8, 473–482. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00408-6>
- Blancas, J., A. Casas, H. Ramírez-Monjaraz, A. Martínez-Ballesté, I. Torres-García, I. Abad-Fitz y M. Vallejo. (2023). Ethnobotany of the Nahua Peoples: Plant Use and Management in the Sierra Negra, Puebla, Mexico. En: Casas A., J. J. Blancas (eds.), *Ethno-botany of the Mountain Regions of Mexico, Eth-nobotany of Mountain Regions*. Springer Nature Switzerland AG. Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99357-3_19
- Brundrett, M., Tedersoo, L. (2020). Resolving the mycorrhizal status of important northern hemisphere trees. *Plant Soil* 454: 3-34. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04627-9>
- Carrasco, J. C., L. F. Lema, C. R. Chávez, V. Caballero-Serrano, R. Itle y D. J. Chavez. (2023). Social Perception of the Ecosystem Services of *Prunus serotina* subsp. *capuli* in the Andes of Ecuador. *Land*, 12(5), 1086. <https://doi.org/10.3390/land12051086>
- Carrillo-Saucedo, S. M., J. Puente-Rivera, S. Montes-Recinas y R. Cruz-Ortega. 2022. Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana* 129: e1932. DOI: <http://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Chandrasekaran, M., Boopathi, T., and Manivannan, P. (2021). Comprehensive Assessment of Ameliorative effects of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating Abiotic Stress in Tomato Plants. *Journal of Fungi*. 7(4), 303. DOI: [10.3390/jof7040303](https://doi.org/10.3390/jof7040303).
- Di Martino, C., Fioretto, A., Palmieri, D., Torino, V., y Palumbo, G. (2019). Influence of tomato plant mycorrhization on nitrogen metabolism, growth and fructification on P-Limited Soil. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(4), 1183–1195. DOI: [10.1007/s00344-019-09923-y](https://doi.org/10.1007/s00344-019-09923-y).
- Dickson, A., A. Leaf and J. Hosner. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedlings stock in nurseries. *Forest Chronicle* 36(1):10-13. <https://pubs.cif-ifc.org/doi/10.5558/tfc36010-1>
- Duryea, M. . (1985). Evaluating Seedling Quality: Importance to Reforestation. In *Proceedings: Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests* (Issue 2, pp. 1–4).
- Feldmane, D., Druva-Lūsīte, I., Pole, V. et al. (2021). *Rhizophagus irregularis* MUCL 41,833 Association with Green Cuttings of *Prunus* sp. Rootstocks. *J Plant Growth Regul* 40, 533–540. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10116-1>
- Fresnedo R. J., Segura S., & Muratalla-Lúa A. (2011). Morphovariability of capulín (*Prunus serótina* Ehrh.) in central-western region of Mexico from a plant genetic resources

- perspective. *Genet Resour Crop Evol*, 58 (4): 481-495. DOI: 10.1007/s10722-010-9592-2.
- Gerdemann, J., y Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological society*, 46(2), 235–244.
- González, J., Pérez, A., & Rodríguez, M. (2012). Impacto del sistema radicular en la adaptación de plántulas a condiciones de estrés. *Revista de Botánica Experimental*, 45(3), 215-228.
- Guzmán, F., S. Segura-Ledesma y G. Almaguer-Vargas. (2020). El capulín (*Prunus serotina*, Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques* 26(1): 1-11. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611866>
- Haghighi, M., S. Mohammadnia, Z. Attai y M. Pessarakli. (2017). Effects of mycorrhiza inoculation on cucumber growth irrigated with saline water. *Journal of Plant Nutrition* 40(1): 128-137. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1201499>
- International Culture Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAN). (2018). Species descriptions from reference cultures, agricultural sciences building, west virginia university. west virginia university. Disponible en <http://fungi.invam.wvu.edu/the-fungi/species-descriptions.html>
- Liu, R., Chen, Y. (2024). Mycorrhizal Symbiosis: Evolution, Opportunities, Challenges, and Prospects. In: Parihar, M., Rakshit, A., Adholeya, A., Chen, Y. (eds) *Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Sustainable Agriculture: Inoculum Production and Application*. Springer. DOI: 10.1007/978-981-97-0296-1_1.
- Lotfi, M., Fernyez, K., Vermeir, P., Mars, M., y Werbrouck, S. (2019). In vitro mycorrhization of pear (*Pyrus communis*). *Mycorrhiza*, 29(6), 607-614. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00919-w>.
- Marín Cuevas, C. V., Herrera-Feijoo, R. J., Carranza-Patiño, M. S., & Morante-Carriel, J. (2023). Inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en *Ochroma pyramidale* (balsa) en fase de vivero. *Green World Journal*, 6(2), 84. <https://doi.org/10.53313/gwj62084>
- Martínez, P., López, L., & Sánchez, F. (2015). Relación tallo/raíz en plántulas de especies forestales: Implicaciones para su supervivencia en suelos no controlados. *Journal of Agricultural Sciences*, 63(7), 1234-1247.
- Meddich, A., Ait Rahou, Y., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Fakhech, A., Lahbouki, S., ... Wahbi, S. (2021). Role of mycorrhizal fungi in improving the tolerance of melon (*Cucumis melo*) under two water deficit partial root drying and regulated deficit irrigation. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 156(2), 469–479. <https://doi.org/10.1080/11263504.2021.1881644>

- Nieder, R. D.K. Benbi y F.X. Reichl. (2018). Role of Potentially Toxic Elements in Soils en Soil Components and Human Health, 1st ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, pp. 375-450. DOI: 10.1007/978-94-024-1222-2.
- Phillips, J. M. and Hayman, D. S. (1970). Improve procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, for rapid assessment of infection. Trans. Brit. Mycol. Soc. 55: 158-160.
- Prieto R., J. Á., J. L. García R., J. M. Mejía B., S. Huchín A. y J. L. Aguilar V. (2009). Producción de planta del género Pinus en vivero en clima templado frío. Publicación Especial Núm. 28. INIFAP-Centro de Investigación Regional Norte Centro. Durango, Dgo., México. 53 p. <https://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/09%20Manuales%20t%C3%A9cnicos/Lista%20de%20documentos/Viveros%20forestales/Manual%20Produccion%20de%20planta%20de%20Pinus%20en%20vivero.pdf>
- Püschel D, Bitterlich M, Rydlová J, Jansa J (2020) Facilitation of plant water uptake by an arbuscular mycorrhizal fungus: a Gordian knot of roots and hyphae. Mycorrhiza 30:299–313. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00949-9>.
- Quiroz Marchant, I., Chung Guin-po, P., García Rivas, E., et al (2009). Caracterización de las Plantas. En: Vivero forestal: producción de plantas nativas a raíz cubierta (pp. 40-46). INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17366>
- Renault, H., Werck-Reichhart, D., & Weng, J. K. (2019). Harnessing lignin evolution for biotechnological applications. Current Opinion in Biotechnology, 56, 105-111. doi: 10.1016/j.copbio.2018.10.011
- Rodríguez, L. y B. Farfán. (2014). Manejo tradicional del capulín (*Prunus serotina* spp. capuli) en San Francisco Pichátaro, Michoacán. En: Arias, G., F. Zurita y M. L. Uranga (Eds.). Sustentabilidad e interculturalidad paradigmas entre la relación cultura y naturaleza. Michoacán, México. https://www.researchgate.net/publication/343404192_SUSTENTABILIDAD_E_IN_TERCULTURALIDAD_Paradigmas_entre_la_Relacion_Cultura_y_Naturaleza
- Sáenz R., J. T., H. J. Muñoz F., C. M. Á. Pérez D., A. Rueda S. y J. Hernández R. (2014). Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero “Morelia”, estado de Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5(26):98-111. Doi: 10.29298/rmcf.v5i26.293.
- Sales, F. R., Silva, A. O., Sales, L. R., Rodrigues, T. L., de Souza Moreira F. M, y Carneiro. M. A. C. (2021). Native arbuscular mycorrhiza fungi exhibit biotechnology potential in improvement of soil biochemical quality y in increasing yield in sugarcane cultivars. Sugar Tech, 23(6), 1235-1246. DOI: 10.1007/s12355-021-01016-z.
- Viera, W., A. Sotomayor, V. Tamba, W. Vásquez, A. Martínez, P. Viteri y L. Ron. (2016). Estimación de parámetros de calidad del fruto para segregantes interespecíficos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) en respuesta de resistencia a la

- Antracnosis (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds). *Acta Agron.* 65(3): 304-311. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.49771>
- Wu, Q., Li, G. and Zou, Y. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient acquisition of peach (*Prunus persica* L. Batsch) seedlings. *J. Anim. Planta. Sci.* 21:746-750. <https://www.thejaps.org.pk/docs/21-4/16.pdf>
- Zai, XM., Fan, JJ., Hao, ZP. et al. (2021). Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing fungi on nutrient uptake and photosynthesis of beach palm under salt stress environment. *Sci Rep* 11, 5761. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84284-9>
- Yang H., Zhang Q., Dai Y., Liu Q., Tang J., Bian X., et al. (2014). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth depend on root system: a meta-analysis. *Plant Soil* 389, 361–374. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2370-8>

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES

Los métodos de escarificación usados en semillas de capulín pueden reducir el tiempo de germinación al eliminar los mecanismos inhibidores, como la dormancia de la semilla, y mejorar el porcentaje de germinación, siempre y cuando el endocarpio sea retirado.

El método de escarificación por remojo/secado presenta varias ventajas sobre el método de escarificación química, ya que es un método simple, de bajo costo, de fácil acceso y con mayor seguridad, minimizando posibles daños a las semillas y reduciendo el uso de sustancias químicas.

El uso de biofertilizantes, como las micorrizas arbusculares, demostraron un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas de capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) cultivadas en condiciones de invernadero.

Las micorrizas arbusculares lograron formar asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, mejorando la absorción de nutrientes esenciales para el crecimiento, además de incrementar la altura de las plantas, y el desarrollo de la biomasa aérea.

Las plantas micorrizadas superaron considerablemente a su contraparte fertilizada químicamente, lo que destaca la efectividad de los microorganismos benéficos apuntando a una alternativa ecológica para la agricultura.

El uso de micorrizas resulta ser una buena alternativa al fertilizante químico ofreciendo un enfoque más ecológico y económico debido a la única aplicación, aportando beneficios a largo plazo, a diferencia de los efectos obtenidos en múltiples aplicaciones.

Es recomendable realizar labores culturales al interior del invernadero para garantizar un manejo adecuado de las plantas, previniendo el sobrecrecimiento derivado de la competencia por recursos como luz, agua y espacio. Además, de reducir los riesgos de estrés en las plantas, que podría perjudicar su crecimiento, desarrollo y calidad final.