UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

# Efecto de Hongos Endófitos en el Crecimiento y Nutrición de *Pinus Cembroides* en Vivero

Por:

**MERCED MARTÍNEZ GALLARDO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Efecto de Hongos Endófitos en el Crecimiento y Nutrición de *Pinus cembroides* en Vivero

Por:

**MERCED MARTÍNEZ GALLARDO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoria:

Dr. Rosalinda Cervantes Martínez

Asesor Principal

Dra. Rebeca Casique Valdés

Asesor Principal Externo

Dra. Rosa Elvira Madrid Aispuro

Coasesor

Dra. Susana González Morales

Coasesor

Dr. Alberto Sandoval Rangel

Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2025.

## Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citar; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal

Mereed Martínez Gallardo

# AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi alma mater, por recibirme con las puertas abiertas y darme la oportunidad a esta bella experiencia, por brindarme todo lo necesario para mi formación académica y profesional.

A los profesores del **Departamento Forestal** que a lo largo de mi formación académica me brindaron lo mejor de sí, por compartir sus conocimientos y experiencias necesarias para enfrentar el mundo laboral.

A mis Padres **Crisóstomo Martinez y Celerina Gallardo** por estar presentes, por apoyarme en cada paso, aun en las condiciones más difíciles, por cada abrazo y palabras de aliento.

A mis hermanos **Telesforo y Jacob**, gracias por apoyarme aun cuando las cosas no eran fáciles para ustedes, por confiar en mí, los admiro demasiado.

A mis amigos **Cari, Juli, Ali, Yoa, Jaime, Dani** y **B. David** que estuvieron en el transcurso de todo este proceso, por las noches de desvelo, por lo abrazos, por las risas y sobre todo por su compañía, los aprecio mucho.

A la **Dra. Rebeca Casique Valdés**, por compartirme su conocimiento, experiencia y amor a la ciencia, por darme la oportunidad de trabajar en conjunto, gracias por su paciencia y optimismo, por creer en mí y sobre todo por acompañarme desde el inicio de este proyecto.

A la **Dra. Rosalinda Cervantes M**., por aceptar ser parte de este proyecto, por compartir su conocimiento y experiencia

A la **Dra. Rosa Elvira Madrid A**., por ser parte de este proyecto, por compartir su conocimiento y experiencia.

A la **Dra. Susana González M**. por ser parte de este proyecto, por compartir su conocimiento y experiencia.

# DEDICATORIA

A mi Padre, **Crisóstomo Martínez Morelos**, por darme la libertad de elegir mi propio camino, por estar en cada paso precipitado que he dado, por apoyarme en cada momento, por alentarme a seguir mis sueños, por confiar en mí, por hacerme fuerte, por corregirme, gracias papá, por ti estoy donde estoy, gracias por todo el amor que me has demostrado desde el día uno que me tuviste en tus brazos, sé que mis sueños son tan tuyos como míos. Te admiro muchísimo papá, por lo fuerte que eres ante las condiciones más complicadas que nos ha puesto la vida, gracias por ser el mejor Papá, te quiero y admiro con todo mi ser, gracias por todo.

A mi Madre, **Celerina Gallardo Chávez**, por siempre apoyarme, abrazarme a la distancia, por secar mis lágrimas, por acompañarme en los días que el sueño me vencía, por sus lindas palabras de aliento que me mantuvieron fuerte, gracias madre por confiar en mí, sé que este logro es tanto tuyo como mío, Gracias por tanto madre, te amo con toda el alma.

A mis hermanos, **Telesforo y Jacob** no me cabe en el corazón como agradecerles, por tanto, apoyo aun en la distancia, este logro es tanto mío como de ustedes, a mis hermanitas **Daniela, Nathaly y Alejandra**, gracias por ser parte de este sueño y por alentarme a ser mejor persona y mejor hermana cada día.

A **Carina Rico Cruz**, por su linda amistad que me regalo la uní, no tengo palabras para agradecerte lo que ha sido todo este proceso, por compartir parte de tu vida conmigo, por regalarme un abrazo cuando más lo necesitaba, por las risas, los llantos, por ser mi hermana, por estar en las buenas, en las malas y en las peores, estarás en mi corazón siempre, te quiero mucho mi corazón de melón.

A **July, Ali, Yoa, Jaime, julia, Dani**, **B. David**, gracias por acompañarme en esta bonita etapa universitaria, por compartir parte de su vida conmigo

A la **Dra. Rebeca Casique Valdés**, gracias por compartirme de su tiempo, conocimiento, experiencia y amor a la ciencia, por su paciencia y optimismo, por creer en mí.

A **mí,** por nunca rendirme cuando las cosas se complicaron en el proceso de mi formación académica, por afrontar la responsabilidad de mi decisión aun cuando no tenía los ánimos para hacerlo, por nunca desistir, sé que las condiciones de todo mi proceso como persona, es parte esencial de lo que soy ahora.

# ÍNDICE GENERAL

**Página**

ÍNDICE DE CUADROS ..... iii

ÍNDICE DE FIGURAS ..... iv

RESUMEN ..... v

1. INTRODUCCIÓN ..... 1

1.1. Objetivos e hipótesis ..... 2

Objetivo general ..... 2

Objetivos específicos ..... 2

Hipótesis ..... 2

2. REVISIÓN DE LITERATURA ..... 3

2.1. Distribución e importancia del género *Pinus* ..... 3

2.2. *Pinus cembriodes* ..... 4

2.3. Pérdidas forestales ..... 6

2.3.1. Programas de reforestación ..... 7

2.4. Factores que influyen en la calidad de planta en vivero ..... 8

2.4.1. Calidad de planta ..... 8

2.4.2. Microorganismos benéficos en la producción de planta forestal en vivero ..... 9

2.4.3. Microrganismos endófitos asociados a *Pinus* ..... 10

2.4.4. Metabolitos que producen los hongos endófitos ..... 12

2.4.5 Uso de hongos endófitos para la promoción de crecimiento de *Pinus* ..... 13

2.4.6. Microorganismos benéficos reportados en *Pinus cembroides* ..... 14

3. MATERIALES Y MÉTODOS ..... 16

3.1. Descripción del área de estudio ..... 16

3.2. Obtención de las cepas de hongos endófitos ..... 16

3.3. Producción de plántulas en vivero ..... 16
3.4. Obtención del inóculo ..... 17
3.5. Tratamientos y diseño experimental ..... 18
3.5.1 Tratamiento control ..... 18
3.6. Variables morfológicas evaluadas ..... 18
3.7. Análisis nutrimental ..... 19
3.8. Determinación de glucosamina ..... 20
3.9. Análisis estadístico ..... 21
4. RESULTADOS ..... 22
4.1. Variables morfológicas evaluadas ..... 22
4.2. Absorción de nutrientes ..... 24
5. DISCUSIÓN ..... 26
6. CONCLUSIONES ..... 28
7. RECOMENDACIONES ..... 29
8. BIBLIOGRAFÍA ..... 30

# ÍNDICE DE CUADROS

**Cuadro 1.** Desglose de los tratamientos aplicados a plántulas de *Pinus cembroides* en vivero. ..... 19

**Cuadro 2.** Resultados de altura total, fuste y diámetro del cuello, en tratamientos con distintas cepas de inoculo en el crecimiento de *Pinus cembroides*.....22

**Cuadro3.** Resultados de pesos seco total, peso fresco de raíz, peso seco de raíz y glucosamina, en tratamientos con distintas cepas de inoculo en el crecimiento de *Pinus cembroides*…….27

**Cuadro 4.** Efecto de diferentes inoculaciones con hongos endófitos sobre el contenido de nutrientes de plántulas de *Pinus cembroides*. Los valores representan la media ± error estándar de cuatro réplicas (la unidad experimental fueron cinco plántulas). Las medias dentro de una columna seguidas por la misma letra superíndice no presentan diferencias significativas……...……..……...25

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Preparación del sustrato para el trasplante de plántulas de Pinus cembroides. ... 17
**Figura 2.** Crecimiento fúngico en agar PDA y extracción de explantes de 0.5 cm de diámetro para obtener crecimiento en el medio MNM. ... 17
**Figura 3.** Cepas de hongos endófitos desarrollados en medio de cultivo líquido Merlin-Norkans modificado (MNM). ... 18
**Figura 4.** Evaluación de variables agronómicas en plántulas de Pinus cembroides después de la aplicación de tratamientos. ... 19
**Figura 5.** Curva estándar de 0–200 μg mL−1 con glucosamina y ecuación de la recta. ... 20
**Figura 6.** Proceso para la determinacion de glucosamina en raíz. ... 21
**Figura 7.** Comparación de los diferentes tratamientos de hongos endóftios evaluados con relación a la longitud de de la raíz y altura de la planta. TM= tierra de monte, T0= control, T1= Dactylonectria alcacerensis, T2= Nectriella pironii, T3= Phialophora livistonae, T4= Pochonia chlamydosporia, T5= Helotiales sp., T6= Cadophora sp., T8= Pochonia sp., T9= Thelonectria veuillotiana, T10= Endoraciella communis. ... 24
**Figura 8.** Contenido de absorción de nutrientes (%) en las plántulas de Pinus cembriodes inoculadas con hongos endófitos. TM= tierra de monte, T0= control, T1= Dactylonectria alcacerensis, T2= Nectriella pironii, T3= Phialophora livistonae, T4= Pochonia chlamydosporia, T5= Helotiales sp., T6= Cadophora sp., T8= Pochonia sp., T9= Thelonectria veuillotiana, T10= Endoraciella communis. ... 25

## RESUMEN

La creciente demanda de productos forestales, sumada a la extensa degradación de los bosques naturales y, los impactos del cambio climático, ha puesto de relieve la importancia crucial de la gestión forestal sostenible y las iniciativas de reforestación a gran escala. Las especies del género *Pinus* se encuentran entre las especies arbóreas más plantadas a nivel mundial debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad a diversos tipos de suelo y alto valor económico; sin embargo, el éxito del establecimiento de plantaciones a menudo se ve comprometido en la etapa de plántula en los viveros. El presente estudio evaluó la efectividad de hongos endófitos en la nutrición y crecimiento del *Pinus cembroides* en vivero. Para ello, se obtuvieron semillas de *P. cembroides* las cuales se sembraron y aclimataron en las instalaciones del vivero forestal del departamento forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, se evaluaron 9 cepas de hongos endófitos: *Cadophora* sp*., Dactylonectria alcacerensis, Endoradiciella communis, Helotiales sp., Nectriella pironii, Pochonia chlamydosporia, Phialophora livistonae, Pochonia* sp*.,* y *Thelonectria veuillotiana* obtenidos previamente de raíces de pino piñonero y cultivados en medio líquido Melin Norkrans, así como dos controles, uno positivo (suelo forestal como inóculo) (TM) y uno negativo (medio de cultivo sin hongo) (T0); se destinaron 20 repeticiones por cada tratamiento colocados aleatoriamente, el tratamiento inició a los 15 días de ser trasplantado, con una aplicación cada 40 días, correspondiente a un total de cuatro aplicaciones.

Al finalizar las aplicaciones, se evaluó el crecimiento en altura, diámetro de tallo, fuste, biomasa fresca y seca de tallo y raíz, longitud de raíz y absorción nutrimental de los elementos B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, P, S, y Zn mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente, aunado a la cantidad de glucosamina en raíz.

Los tratamientos *Phialophora livistonae*, *Pochonia* sp. y *Endoradiciella communis* se destacaron por su capacidad para fomentar su asociación con raíces, según la concentración de glucosamina. El hongo endófito *Endoradiciella communis* emergió como el tratamiento más consistente, mostrando valores máximos o cercanos al máximo en la mayoría de las variables (altura, fuste, biomasa total y radical, y glucosamina). Se encontró que los hongos aplicados demostraron ser efectivos en la movilización de nutrientes ya que superaron al

tratamiento TM y control en la movilización de fósforo, azufre y nitrógeno. Se encontró que el hongo *Endoradiciella communis* y TM mostraron el contenido más alto de carbono.

Palabras clave: *Endoradiciella communis*, glucosamina, pino piñonero, variables agronómicas

# 1. INTRODUCCIÓN

Ciertos organismos habitan en las plantas sin causar un daño o síntoma aparente de enfermedad, como el caso de los hongos endófitos, la estrecha relación que existe entre los hongos y la planta hospedera se considera de gran importancia, puesto que estos son capaces de producir metabolitos bioactivos, modificar los mecanismos de defensas de la planta hospedadora permitiendo asi el incremento y sobrevivencia de ambos (Sánchez-Fernandez et al., 2013).

En particular, los hongos endófitos representan un grupo relevante de microorganismos que contribuyen significativamente al desarrollo y desempeño fisiológico de las plantas hospedadoras, especialmente de las especies leñosas. Entre sus principales aportes se encuentran la promoción del crecimiento, el fortalecimiento de la tolerancia a diversos tipos de estrés, la mejora en la absorción y aprovechamiento de nutrientes, así como el incremento de la resistencia frente a la incidencia de patógenos. (Qin et al., 2qin023). Los hongos endófitos contribuyen al crecimiento vegetal mediante una serie de mecanismos directos e indirectos que fortalecen la funcionalidad fisiológica de sus plantas hospedadoras. Estos microorganismos pueden activar o producir diversos metabolitos que confieren ventajas adaptativas, entre ellas el incremento de la tolerancia frente a factores de estrés biótico y abiótico, así como la mejora general del vigor y desarrollo de la planta. Dentro de sus funciones más relevantes se encuentra la capacidad de solubilizar compuestos insolubles de fosfato, lo que incrementa la disponibilidad y absorción de fósforo (P); fijar nitrógeno atmosférico; y sintetizar sideróforos que facilitan la adquisición de hierro. Asimismo, muchos endófitos producen fitohormonas como auxinas, giberelinas, etileno, ácido abscísico y ácido indolacético (AIA), las cuales desempeñan un papel fundamental en la regulación del crecimiento, diferenciación y respuesta al estrés en las plantas hospedadoras. (Sudha et al., 2016).

Estos pueden distinguirse de las micorrizas por la ausencia de estructuras externas como hifas o micelio; además, cuentan con capacidad para explotar diferentes fuentes nutricionales (Aragón, 2018).

Para ello, se evaluó la influencia de los hongos endófitos en plántulas de *Pinus cembroides* en sus variables morfológicas y la absorción de nutrientes en vivero.

## 1.1. Objetivos e hipótesis

### Objetivo general

Evaluar el efecto de los hongos endófitos en la nutrición y crecimiento morfológico de *Pinus cembroides* producido en vivero.

### Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la inoculación de nueve cepas de hongos endófitos en el crecimiento morfológico de *Pinus cembroides* producido en vivero.

Evaluar variables agronómicas de plántulas de *P. cembroides* de cada tratamiento evaluado.

Evaluar la absorción de nutrientes en plántulas de *P. cembroides* de cada tratamiento evaluado.

Evaluar la concentración de glucosamina en el sistema radical de *P. cembroides* producido en vivero.

### Hipótesis

Ho. Las cepas de hongos endófitos aplicados no tendrán ningún efecto en el crecimiento morfológico y absorción de nutrientes en las plántulas de *Pinus cembroides*.

Ha. Al menos una cepa de hongo endófito generará mejor respuesta en algunas de las variables morfológicas y absorción de nutrientes en las plántulas de *Pinus cembroides* en vivero respecto al testigo.

# 2. REVISIÓN DE LITERATURA

## 2.1. Distribución e importancia del género *Pinus*

En Norteamérica se reconocen tres regiones de alta diversidad de especies de pinos, con distribución en México, California y sureste de EUA (Sánchez-Gonzalez, 2008).

Las especies de pino son originarias del hemisferio Norte, y en el continente americano se localizan desde los 66°00′00″N, en el norte de Canadá, hasta los 12°00′00″N hacia el sur de Nicaragua. En la Sierra Madre Oriental y Sierra Madre Occidental de México se asienta la mayor diversidad del género *Pinus* (Pinaceae) en el mundo, con alrededor de 52 especies de pinos (Moctezuma & Flores, 2020)

Se han descrito las características del género *Pinus*: arboles perennifolios, resinosos, con hojas aciculares, que van de 1 a 8 acículas por fascículos, con tamaños de 2.5cm a >40 cm de largo, la altura del árbol varía con la especie, van desde árboles pequeños de 5 a 50 m o más (Rodríguez & Quiahua, 2021).

Los recursos forestales de México, así como el sector productivo y de conservación asociado a ellos, representan un componente estratégico para el desarrollo ambiental, económico y social del país. México cuenta con una cubierta forestal de aproximadamente 137.8 millones de hectáreas, lo que equivale al 70.3 % de su superficie total. Esta amplia extensión forestal posiciona al país como una nación con alta diversidad de tipos de vegetación, además de una notable riqueza en especies de flora y fauna silvestres. (CONAFOR, 2020).

México se distingue por poseer una de las mayores diversidades de Pinus a nivel global, al concentrar poco más de 52 de las 111 especies reportadas, lo que representa aproximadamente el 50 % del total mundial. La mayoría de estas especies presentan distribuciones geográficas y ambientales altamente restringidas, asociadas a rangos específicos de altitud, clima y características edáficas, su presencia y abundancia en el territorio nacional están estrechamente determinadas por las condiciones climáticas y del suelo que predominan en los sitios donde se desarrollan (Martinez et al., 2020).

El género *Pinus* posee una relevancia ecológica, económica y social, su alto valor económico se debe a que constituye una fuente primaria de madera, leña, pulpa, resina y semillas, recursos que sostienen de manera directa a la industria forestal. Asimismo, estos ecosistemas proporcionan importantes servicios ambientales, entre los que destaca su influencia en la regulación del clima regional, lo que refuerza su papel estratégico en la gestión y conservación de los recursos naturales. (Aceves-Rangel et al., 2018).

Los bosques de pinos se encuentran clasificados en dos tipos de comunidades vegetales: bosques primarios de pino y bosques mixtos (pino-encino y encino-pino); y crecen a diferentes elevaciones, cercanos a 0 y hasta 4000 m. La superficie de bosques de pinos puros y mixtos, en México, es de 205 343.50 $km^2$, de los cuales el 64 % son bosques primarios y el 36 % son bosques secundarios arbustivos (Pérez-Miranda et al., 2022).

Las entidades que cuentan con mayor superficie forestal destacan Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Baja California Sur que, en conjunto, representan cerca de la mitad de la superficie forestal nacional (48.8 %). Por la frecuencia e importancia de su aprovechamiento y uso, las principales especies son: *Pinus arizonica, P. durangensis, P. engelmannii; P. pseudostrobus, P. patula, P. montezumae, P. teocote, P. hartwegii*, así como los géneros *Abies* (oyamel) y *Quercus* (encino) (CONAFOR, 2024).

### 2.2. *Pinus cembroides*

Es una especie originaria de México que se extiende desde el sur de los Estados Unidos, son árboles de tronco corto y ramas ascendientes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo, es una especie monoica de lento crecimiento, la maduración del cono dura aproximadamente entre 30 y 36 meses después de la polinización (CONAFOR, 2025).

Es una de las especies de pino de mayor distribución en México, donde las mayores poblaciones están en: Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Zacatecas. Considerando la variación de la temperatura, es posible encontrar dos grandes zonas en la distribución de esta especie, una al norte del Trópico de Cáncer, desde Coahuila y Durango hasta Baja California, dónde la temperatura varía más de 10 °C. La otra al Sur, donde la

variación anual de la temperatura es menor de 10 °C, en los estados de Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas (CONAFOR, 2025).

*Pinus cembroides* forma parte del grupo de los pinos piñoneros y se caracteriza por su amplia adaptación a condiciones ambientales restrictivas, esta especie se distribuye en regiones cuya precipitación media anual varía entre 350 y 700 mm, principalmente en laderas montañosas, lomeríos y zonas al pie de cerros, donde predominan pendientes secas y con elevada presencia de rocosidad. Su desarrollo se asocia a climas templado-secos a templado-subhúmedos, presentando una notable tolerancia a periodos de sequía que pueden extenderse de siete a ocho meses. Los suelos en los que comúnmente prospera son pobres en fertilidad, con baja disponibilidad de humedad, de naturaleza pedregosa y caliza, y con tonalidades que oscilan entre grisáceas y negras. Asimismo, estos sustratos presentan condiciones calcáreas y valores de pH de neutro a alcalino, lo que evidencia la capacidad de la especie para establecerse en ambientes edáficos limitantes (Constante, 2009).

Esta especie interviene en el ciclo del agua, contribuye en la disminución de la erosión del suelo y es hábitat de fauna silvestre, la semilla se considera como alimento básico para diversas especies de aves y mamíferos, este pino es de lento crecimiento, con alto potencial de adaptación a condiciones desfavorables. Las temperaturas bajas le resultan favorables para producir conos, además se considera una especie óptima para reforestar zonas áridas y semiáridas de México (Torres et al., 2025).

En México, *Pinus cembroides* es la especie piñonera más ampliamente distribuida, ya que su área de localización geográfica conocida se extiende por casi todo el Norte y Centro del país. Los bosques de piñoneros se localizan en climas semiáridos y crecen en poblaciones puras o mezclados con encinares arbustivos y arbóreos, colindante en ocasiones con pastizales (Sandoval, 1998).

## 2.3. Pérdidas forestales

A nivel mundial, entre 1990 y 2020 se registró una pérdida acumulada de aproximadamente 178 millones de hectáreas de superficie forestal, el ritmo de deforestación mostró una tendencia baja a lo largo de este periodo, la reducción no fue uniforme, por lo que la pérdida neta anual pasó de 7.8 millones de hectáreas entre 1990 y 2000, a 5.2 millones entre 2000 y 2010, y posteriormente a 4.7 millones de hectáreas durante el periodo 2010–2020. No obstante, la disminución observada en la última década fue menos pronunciada, situación que se atribuye principalmente a una desaceleración en la expansión de nuevas áreas forestales, lo que limitó la compensación frente a las superficies que continuaron perdiéndose. (CONAFOR, 2020).

México perdió entre 2001 y 2021 un total de 4.17 millones de hectáreas de bosques y selvas, lo que equivale al 6.3 % de la superficie arbolada nacional. Esta reducción representa una tasa anual de deforestación de 208,850 hectáreas. Cabe señalar que el 68.3 % de dicha pérdida se concentró en nueve entidades federativas (Chiapas, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Quintana Roo, Yucatán, Guerrero, Veracruz y Campeche), las cuales presentaron una tasa combinada de deforestación de 142,720 hectáreas por año, la magnitud de este fenómeno constituye la principal causa de pérdida de biodiversidad terrestre en el país y se reconoce como uno de los factores que incrementa la vulnerabilidad hídrica de las poblaciones frente a los efectos del cambio climático. Los ecosistemas más afectados han sido las selvas secas caducifolias, las selvas medias subcaducifolias, las selvas altas perennifolias y los encinares caducifolios. No obstante, en años recientes se ha observado un aumento significativo de la deforestación en los bosques de pino y pino encino, lo que evidencia una expansión del problema hacia zonas tradicionalmente consideradas de menor presión (Graf, 2024).

Cerca de nueve millones de metros cúbicos de madera que se producen en forma legal en el país, 76 % proviene de bosques comunitarios, los cuales pertenecen a ejidos y comunidades que cuentan con programas de manejo forestal, el 24 % restante se cosecha en predios privados o plantaciones (Castillo & Gómez, 2020).

Con la implementación del programa Sembrando Vida, se propuso impulsar la reforestación mediante subsidios, apoyos económicos y el suministro de semillas. Sin embargo, el

programa no ha logrado cumplir plenamente su objetivo de restaurar la cobertura forestal del país. Diversos reportes indican que alrededor de 72,830 hectáreas se han perdido como consecuencia de una ejecución inadecuada, que en algunos casos ha fomentado la deforestación para el establecimiento de cultivos agrícolas o especies no nativas en los predios (Meza, 2022).

### 2.3.1. Programas de reforestación

Para contrarrestar la deforestación, diversas instituciones gubernamentales y organizaciones comunitarias han puesto en marcha programas de reforestación en distintas regiones del país, los cuales buscan fortalecer la recuperación de la cobertura forestal (Bernaola, 2022).

La reforestación se ha consolidado como una estrategia fundamental para la recuperación de la cubierta vegetal, elemento indispensable para el bienestar humano y para la restauración de la funcionalidad ecológica de cuencas y paisajes. Este proceso no solo favorece la conservación y rehabilitación de los ecosistemas, sino que también contribuye al mantenimiento y aprovechamiento sustentable del patrimonio natural y los servicios ecosistémicos que de él derivan. En este contexto, múltiples iniciativas promovidas por los sectores público y privado han impulsado programas de reforestación a diferentes escalas. Sin embargo, entre las especies utilizadas, las coníferas del género *Pinus* enfrentan importantes desafíos relacionados con su manejo, establecimiento y adaptación en campo, lo que limita sus tasas de supervivencia y, en consecuencia, el éxito de las acciones de reforestación (Bernaola, 2022).

Con la finalidad de contrarrestar el deterioro ambiental derivado de los desmontes, incendios forestales, tala clandestina, pastoreo, así como de la incidencia de plagas y enfermedades, en 1995 el Gobierno Federal instauró el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE). Este programa fue diseñado como un instrumento estratégico para recuperar e incrementar la cobertura vegetal del país, además de promover la restauración y protección de los ecosistemas afectados. No obstante, a nivel nacional se ha documentado que, de las 484 especies vegetales empleadas por el PRONARE, únicamente el 31.4 % corresponde a árboles y arbustos nativos; dentro de este grupo, solo el 9.7 % pertenece a especies de coníferas,

mientras que el resto corresponde a especies latifoliadas de zonas templadas y tropicales. (Niembro, 2001).

El pino piñonero se ha plantado para la producción de piñones durante más de 6.000 años y sus piñones se han recolectado de árboles silvestres desde mucho antes. Incluso en la actualidad, los piñones se cosechan principalmente en bosques naturales prácticamente no manejados y son considerados un producto forestal no maderable (PFNM) (Loewe, 2024).

### 2.4. Factores que influyen en la calidad de planta en vivero

Dentro de los atributos morfológicos que promueven la supervivencia de las plantas, está la altura, el diámetro y desarrollo radical, así como el volumen de contenedor el cual influye de manera significativa. Por tanto, es probable que el volumen del contenedor refleje importantes cambios en la supervivencia sobre todo en sitios con condiciones ambientales poco favorable (Bernaola, 2022).

El sustrato constituye el medio fundamental donde las plantas realizan sus primeras etapas de desarrollo, por lo tanto, la calidad se determina en los viveros, ya que influye directamente en la conformación del sistema radicular y la parte aérea, tanto desde el punto de vista fisiológico como anatómico. En consecuencia, el sustrato incide en el estado nutricional y en la calidad general de la planta , misma que promueve un desarrollo óptimo de las raíces, lo que se traduce en la formación de plantas de mayor calidad y con mejores probabilidades de supervivencia una vez establecidas en campo (Nava, 2024).

#### 2.4.1. Calidad de planta

La calidad de una planta se refiere a su capacidad para establecerse, adaptarse y crecer bajo las condiciones climáticas y del suelo del lugar donde será plantada. Esta calidad está determinada tanto por las características genéticas del germoplasma como por los métodos empleados en su propagación (Prieto et. al., 2009).

La morfología y fisiología de la planta son características relacionadas con la calidad de la planta tales como: altura de la planta, diámetro del cuello, presencia de la yema terminal,

grado de lignificación, longitud de la raíz, cantidad de raíces secundarias, relación parte aérea y parte radical, nivel de micorrización, producción de biomasa, contenido de nutrimentos. Entre las características cualitativas se consideran; vigor, color, densidad del follaje y sanidad, estas características pueden medirse de forma simple a excepción del contenido de nutrimentos (Prieto et. al., 2009).

En los viveros forestales, el sustrato es una materia prima de especial interés, debido a que sus características de porosidad, retención de agua, drenaje y disponibilidad de nutrimentos están directamente relacionadas con el crecimiento, producción de materia seca y supervivencia de las especies. Normalmente, los sustratos se formulan con base en mezclas balanceadas de materiales orgánicos e inorgánicos; dichos componentes se seleccionan en función de su estabilidad, manejo, formación de cepellón, sanidad, disponibilidad y costo (González, 2018).

En los viveros, las plantas son sometidas a prácticas de manejo y cuidados específicos para cada especie, con el propósito de garantizar un desarrollo adecuado y asegurar sus supervivencia al momento de su trasplante al sitio definitivo (Nava, 2024).

### 2.4.2. Microorganismos benéficos en la producción de planta forestal en vivero

En la actualidad, surge la necesidad de implementar acciones pertinentes que coadyuven al cuidado y mantenimiento de los ecosistemas forestales, rehabilitación de los suelos, reforestación con plantas de calidad sanitaria en vivero previamente inoculadas con microorganismos benéficos, lo cual aumenta la posibilidad de supervivencia (Ortiz et al., 2025).

Numerosas especies vegetales de interés agrícola establecen relaciones simbióticas con microorganismos presentes en el suelo, particularmente con aquellos identificados como promotores del crecimiento vegetal. Estos microorganismos aportan beneficios significativos al favorecer el desarrollo de la planta y reducir la dependencia de fertilizantes y pesticidas de uso intensivo en los sistemas de producción. En años recientes, el empleo de microorganismos asociados a los cultivos ha aumentado de manera notable, debido a su

potencial para disminuir la aplicación de fertilizantes sintéticos y con ello mitigar los efectos negativos que estos insumos generan sobre el ambiente (Cruz, 2021).

La incorporación de microorganismos asociados a plantas se ha propuesto como una estrategia eficaz para incrementar la productividad agrícola y forestal. En este contexto, el empleo de microorganismos aislados de ecosistemas boscosos, organizados en "consorcios microbianos", representa una alternativa relevante para preservar y aprovechar la diversidad microbiana nativa, estos consorcios se reproducen de manera artesanal con el propósito de utilizarlos posteriormente en unidades de producción agrícola, manteniendo así su compatibilidad ecológica y su funcionalidad biológica, por lo tanto los microorganismos empleados con este fin se agrupan en dos grandes dominios: procariontes y eucariontes. El primero incluye principalmente bacterias, mientras que el segundo comprende hongos, algas y protozoarios, en conjunto estos microorganismos conforman comunidades complejas integradas por hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras y, en menor proporción, microalgas, cuya interacción es esencial para el funcionamiento adecuado de los ecosistemas. Para establecer relaciones benéficas entre la planta y los microorganismos es necesario aplicar inoculantes directamente sobre las semillas y/o el sustrato, lo que favorece su colonización y desempeño funcional, en el ámbito forestal se recomienda que la colecta de las cepas microbianas se realice en sitios pertenecientes a la misma región donde serán utilizadas, con el fin de asegurar su adaptación ambiental y maximizar la eficacia de la inoculación (Nava, 2024).

Stuart et al. (2023), menciona que a través de la inoculación de *Oidiodendron maius* y *Phialocephala fortinii* en *Pinus radiata,* se aumentó la disponibilidad de N, P y otros nutrientes mejorando el contenido de la biomasa de sus huéspedes en estudios *in vitro.*

### 2.4.3. Microrganismos endófitos asociados a *Pinus*

Los hongos constituyen un grupo amplio y diverso de microorganismos ampliamente distribuidos en la mayoría de los ecosistemas terrestres, algunas de estas especies poseen la capacidad de sintetizar metabolitos secundarios con actividades biológicas de alto valor ecológico y biotecnológico. Entre ellos destacan aquellos con potencial para actuar como

agentes de biocontrol, debido a su eficiencia en la inhibición de fitopatógenos y otros organismos perjudiciales, por lo tanto los hongos endófitos han emergido como una fuente particularmente prometedora, ya que producen una variedad de compuestos bioactivos con efectos benéficos sobre las plantas hospedadoras ante microorganismos patógenos, posicionándolos como candidatos relevantes para su aplicación como estrategias de manejo sostenible (Armendariz, 2013).

Los hongos endófitos se definen como microorganismos que completan parcial o totalmente su ciclo de vida dentro de los tejidos de las plantas hospederas sin provocar síntomas visibles de enfermedad, estos organismos se agrupan, de manera general, en dos categorías: clavicipitáceos y no clavicipitáceos. Los endófitos clavicipitáceos presentan una asociación predominantemente con especies de pastos, mientras que los no clavicipitáceos colonizan una amplia diversidad de plantas, incluyendo especies no vasculares, helechos, coníferas y angiospermas. Su clasificación considera múltiples criterios, entre ellos su posición taxonómica, el tipo de planta hospedera, su historia evolutiva y las funciones ecológicas que desempeñan dentro del ecosistema. (Sánchez-Fernandez et al., 2013).

Uvidia (2021), identificó la presencia de nueve géneros y un orden de hongos endófitos. Entre ellos, los grupos con mayor diversidad correspondieron a *Xylaria*, *Colletotrichum*, *Pestalotiopsis* y al orden Diaporthales, el cual mostró una abundancia relativa del 72.09 %. El 27.91 % restante estuvo representado por los géneros *Trichoderma*, *Penicillium*, *Pyrenochaeta*, *Coniochaeta* y *Phaeoacremonium*. Los análisis de riqueza indicaron que la diversidad de hongos endófitos se presentó en mayor proporción en las especies forestales nativas, lo que sugiere una asociación más estrecha y estable entre estos microorganismos.

Diversos estudios realizados en *Pinus chiapensis* han demostrado que el género *Penicillium* posee una amplia diversidad funcional. Si bien algunas de sus especies se han identificado como potencialmente patógenas, otras destacan por sus propiedades benéficas, entre las que se incluyen la promoción del crecimiento vegetal, la producción de fitohormonas, la solubilización de fosfatos, la síntesis de aminoácidos y la secreción de enzimas antioxidantes,

así como de metabolitos secundarios con actividad biológica. Por otro lado, para el género *Trichoderma* se ha documentado que diversas cepas son capaces de inducir respuestas de defensa en las plantas y estimular su crecimiento y desarrollo mediante el establecimiento de un diálogo molecular con las raíces. Este tipo de interacción ha sido ampliamente observado en especies modelo y cultivos agrícolas, como *Arabidopsis thaliana*, tomate, pepino, guisante y canola, así como en diferentes especies de plantas leñosas (Muñoz, 2020).

Otros microorganismos como los endófitos septados oscuros (DSE) por sus siglas en inglés, se han identificado en bosques de pinos y los principales huéspedes estudiados son *P. tabulaeformis*, *Larix gmelinii* y *Pinus sylvestris*, estos DSE forman relaciones simbióticas con la mayoría de las plantas, tienen funciones similares a las de los hongos micorrizicos, en la que generan una gran cantidad de micelio extraradicular en el entorno de la rizosfera y pueden mejorar la absorción y el transporte de N y P por las plantas hospedantes. Los hongos endófitos mejoran la eficiencia fotosintética, promueve el metabolismo de las plantas hospedantes y, cambia el microambiente de la rizosfera de las plantas hospedantes (Xu et al., 2025).

Se han reportado varios taxones de hongos endófitos fijadores de nitrógeno, lo que explica que en algunas gimnospermas puedan crecer en ambientes limitados de N, como lo reportado por Carrel & Frank (2014) donde descubrió que algunas coníferas inoculadas con *Paenibacillus* aislada de *P. contorta,* es fijadora de N2 y crece en suelos limitado de este elemento.

### 2.4.4. Metabolitos que producen los hongos endófitos

Los metabolitos vegetales constituyen compuestos orgánicos sintetizados por las plantas y se agrupan en dos grandes categorías: metabolitos primarios y metabolitos secundarios, cada uno con funciones específicas dentro de los procesos biológicos, los metabolitos primarios se incluyen carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, estos son indispensables para el crecimiento, el desarrollo y el funcionamiento celular, por lo que se encuentran presentes en todas las especies vegetales (Sponsel, 2023).

En términos generales, los metabolitos secundarios son compuestos de baja complejidad estructural que los organismos producen a través de rutas metabólicas no esenciales para la planta hospedera. Si bien no participan de manera directa en los procesos primarios de crecimiento o reproducción, desempeñan funciones complementarias que contribuyen a la adaptación y supervivencia del organismo en su entorno. (Muñoz, 2020). Los hongos endófitos, producen metabolitos bioactivos para modificar los mecanismos de defensa de su planta hospedera, permitiendo e incrementando la sobrevivencia de ambos organismos (Sánchez-Fernandez et al., 2013).

### 2.4.5 Uso de hongos endófitos para la promoción de crecimiento de *Pinus*

El género *Pinus* abarca especies dominantes para la repoblación y forestación, la gran mayoría forman micorrizas. Xu et al. (2025), menciona que algunas especies de pino como el *P. tabulaeformis* son de lento crecimiento, lo que requiere métodos de reproducción vegetal artificial que promuevan y aceleren el crecimiento de las plántulas, en esta etapa, los hongos simbióticos, incluidos los hongos micorrízicos y los hongos endófitos, pueden mejorar el crecimiento y la resistencia al estrés biótico y abiótico. Algunos ejemplos de cepas de hongos micorrícicos reportados en esta especie han sido *Suillus granulatus* (OK335188.1) y *Pisolithus tinctorius* (PP531177.1), y dos DSE, *Pleotrichocladium opacum* (OK335191.1) y *Pseudopyrenochaet* sp. (OK335190.1).

Los hongos endófitos inciden de manera directa en la promoción del crecimiento vegetal, por lo que diversos estudios han documentado que los endófitos aislados de especies del género *Pinus* y de *Picea* favorecen en el desarrollo del sistema radical tanto en plántulas como en esquejes, efecto asociado principalmente a su capacidad para sintetizar y liberar fitohormonas que estimulan los procesos de crecimiento (Doty, 2011).

Es decir, al encontrarse en la parte interna de la planta y obtener los nutrientes necesarios para su supervivencia, los hongos endófitos consideran al hospedero como un nicho protegido, lo que hace mejorar la aptitud en la planta mediante varios mecanismos cuando coloniza la planta. Dichos beneficios pueden ocurrir de manera directa o indirectamente, los mecanismos directos tales como la promoción del crecimiento, son la adquisición de

nutrientes y la producción de fitohormonas, mientras que la tolerancia a estrés biótico y abiótico, incluido el combate contra patógenos, se considera un aspecto indirecto en la promoción del crecimiento (Baron, 2021).

### 2.4.6. Microorganismos benéficos reportados en *Pinus cembroides*

Especies como *Pinus cembroides* adaptadas a ambientes semiáridos, tienen asociaciones simbióticas fundamentales para el establecimiento y persistencia en ecosistemas degradados, suelos erosionados o pobres en nutrientes, donde el estrés ambiental limita la supervivencia y el desarrollo de las plantas. Para ello, la simbiosis con hongos es fundamental para la supervivencia y desarrollo en entornos hostiles, donde la disponibilidad de agua y nutrientes es limitada. Los hongos desempeñan un papel crucial al facilitar la absorción de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo mediante la extensión de su micelio en el suelo, aumentan la superficie de absorción y la disponibilidad de nutrientes para la planta huésped, mejoran la tolerancia a la sequía, protegen a las plantas de los patógenos del suelo al competir por espacio y recursos y al estimular las defensas de las plantas a través del metabolismo primario y secundario (Baeza, 2025).

En *Pinus cembriodes* se han reportado hongos ectomicorrícicos, los endófitos poco se han abordado. Los hongos ectomicorrícicos reportados en raíz son géneros del filo Basidiomycota*Amphinema*, *Bankera*, *Inocybe*, *Paxillus*, *Russula*, *Tomentella*, *Tricholoma*, *Tylospora*) y tres géneros del filo Ascomycota (*Cenococcum*, *Geopora*, *Rhizopogon*) (Baeza, 2025).

La distribución de los hongos fúngicos está fuertemente influida por factores climáticos, un patrón que también se observa en la diversidad de los hongos ectomicorrízicos, cuya riqueza tiende a disminuir conforme aumenta la altitud. No obstante, los linajes ectomicorrícicos más abundantes se concentran principalmente en regiones tropicales afroamericanas, neotropicales y del sudeste asiático. Entre estos destacan los complejos Russula–Lactarius y Tomentella–Thelephora, así como especies características como *Astraeus hygrometricus* y *Pisolithus tinctorius*, típicamente asociadas a bosques de coníferas y pinos, incluidos los pinos piñoneros, particularmente en zonas con condiciones áridas o semiáridas, diversos estudios han demostrado que tanto los elementos del suelo como la altitud ejercen un efecto significativo sobre la composición de la comunidad ectomicorrízica asociada con *Pinus*

*cembroides*. Un ejemplo de ello es la comunidad analizada en el norte de México, donde se registraron 41 géneros de hongos pertenecientes a 22 familias**,** siendo los géneros más abundantes *Rhizopogon*, *Inocybe*, *Russula*, *Tomentella*, *Geopora*, *Tricholoma*, *Clavulina* y *Sebacina*. Estos hallazgos confirman que la variabilidad ambiental influye directamente en la estructura y diversidad de las asociaciones ectomicorrízicas en ecosistemas dominados por pinos piñonero (Casique-Valdés et al., 2025).

# 3. MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1. Descripción del área de estudio

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. La obtención de cepas se realizó dentro del laboratorio del departamento de Fisiología Vegetal del departamento de Horticultura. La producción de plántulas se realizó dentro de un vivero tipo gótico de baja tecnología perteneciente al Departamento Forestal, que se encuentra localizado en las coordenadas geográficas 25° 21´ 10.59´´ latitud Norte y 101° 01´ 38.14´´ longitud Oeste, a una altitud de 1784 m.

## 3.2. Obtención de las cepas de hongos endófitos

Los hongos endófitos utilizados en este estudio se aislaron de raíces de *Pinus cembroides* ubicados en rodales naturales en los estados de Coahuila y Nuevo León, México. Las cepas probadas fueron *Dactylonectria alcacerensis, Cadophora sp., Endoradiciella communis, Helotiales sp., Nectriella pironii, Phialophora livistonae, Pochonia chlamydosporia, Pochonia sp., Thelonectria veuillotiana*.

## 3.3. Producción de plántulas en vivero

La semilla se adquirió del Ejido la Ascensión, Aramberri, Nuevo León del ciclo 2022. Previo a la siembra, se desinfectó por imbibición utilizando peróxido de hidrógeno al 4 % durante 5 horas, se enjuagó y se puso a secar a temperatura ambiente. Se utilizaron charolas de poliestireno de 77 cavidades de 170 mL, como sustrato, se utilizó una mezcla de peat moss y perlita (1:1) (Figura 1), la cual fue esterilizada previamente a 120 °C y1.5 libras de presión por una hora, se sembraron dos semillas por cavidad. Cuatro meses después de la emergencia de la plántula, se trasplantaron a bolsas de polietileno negra de 14 cm de ancho por 20 cm de largo, en una mezcla de sustrato compuesto por peat moss y perlita previamente esterilizado (1:1).

**Figura 1.** Preparación del sustrato para el trasplante de plántulas de *Pinus cembroides*.

### 3.4. Obtención del inóculo

Las cepas de hongos endófitos mencionados se colocaron en medio de cultivo líquido Merlin-Norkans modificado (MNM) con la siguiente composición: glucosa (10 g/L), extracto de malta (3 g/L), extracto de levadura (1 g/L), fosfato dipotásico (0.5 g/L), sulfato de magnesio hexahidratado (0.15 g/L), y fosfato de amonio y potasio (0.5 g/L). En un matraz de 250 mL con 150 mL de medio MNM se colocaron 5 explantes de 0.5 cm de diámetro del crecimiento fúngico previamente obtenido en agar PDA (Figura 2) de los hongos mencionados y se colocó en agitación durante 120 horas a 27°C, se realizó una serie de repeticiones para lograr suficiente inóculo para las plántulas (Figura 2).

**Figura 2.** Crecimiento fúngico en agar PDA y extracción de explantes de 0.5 cm de diámetro para obtener crecimiento en el medio MNM.

Las plántulas se inocularon quince días después del trasplante a la bolsa de polietileno, con 15 mL de medio de cultivo ajustado a 1.5 x $10^{6}$ blastosporas/mL (Figura 3). La inoculación con los endófitos se realizó cada 40 días con un total de cuatro aplicaciones.

**Figura 3.** Cepas de hongos endófitos desarrollados en medio de cultivo líquido Merlin-Norkans modificado (MNM).

### 3.5. Tratamientos y diseño experimental

#### 3.5.1 Tratamiento control

El tratamiento testigo fue la adición del medio de cultivo sin explante, a este se le llamó tratamiento cero, así mismo, se trabajó con un tratamiento positivo, que fue suelo obtenido del horizonte A de una población natural de *Pinus cembroides* ubicada en Arteaga, Coahuila, México (25°23'33.92", 100°41'10.70") como método de producción tradicional en vivero que se realiza como fuente de inóculo de organismos benéficos para las coníferas (Haase et al., 2021).

### 3.6. Variables morfológicas evaluadas

Las plántulas se evaluaron a los seis meses después de la primera inoculación. La tabla 1 desglosa los tratamientos evaluados en las plántulas de *P. cembroides*. Se evaluaron las 20 plántulas por tratamiento, a las que se les retiró la bolsa de polietileno con cuidado de no dañar el sistema radicular, extrayéndolas lo más intacto posible (Figura 4). Las variables de crecimiento vegetal se analizaron mediante cuatro réplicas por tratamiento (5 plantas por unidad experimental).

**Figura 4.** Evaluación de variables agronómicas en plántulas de *Pinus cembroides* después de la aplicación de tratamientos.

**Cuadro 1.** Desglose de los tratamientos aplicados a plántulas de *Pinus cembroides* en vivero.

| Tratamiento | Endófito utilizado o control |
|---|---|
| **T0** | Medio de cultivo MNM |
| **T1** | *Dactylonectria alcacerensis* |
| **T2** | *Nectriella pironii* |
| **T3** | *Phialophora livistonae* |
| **T4** | *Pochonia chlamydosporia* |
| **T5** | *Helotiales sp.* |
| **T6** | *Cadophora sp.* |
| **T8** | *Pochonia sp.* |
| **T9** | *Thelonectria veuillotiana* |
| **T10** | *Endoradiciella communis* |
| **TM** | Tierra de Monte |

### 3.7. Análisis nutrimental

Para la determinación de elementos por ICP-OES, el follaje de cinco plántulas secas por repetición se molió para obtener un polvo fino usando un mortero de cerámica y se tamizó a malla No. 100 (0.149 mm). El análisis de elementos se realizó por triplicado (5 plántulas por réplica por cada tratamiento) de los elementos B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, P, S, y Zn mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (Optima 8300, Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.) (Boss y Fredeen, 2004). Para el contenido

de carbono y nitrógeno total se usó el analizador elemental CHNS/O (Flash-Smart, Perkin Elmer, Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, EE. UU.).

### 3.8. Determinación de glucosamina

Para determinar la colonización fúngica por el método de glucosamina, se utilizó la técnica modificada de Blix (1948). Se colocó una muestra seca (100 mg) de raíces en tubos de vidrio (50 mL) y se añadieron 5 mL de $H_2SO_4$ 5 N, se agitó durante 15 min y se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min. La pastilla se lavó dos veces con agua destilada. La muestra se transfirió con una espátula a un tubo de vidrio (13 mm × 100 mm) con tapón de rosca y se añadieron 100 µL de HCl 10 M. Las muestras se incubaron durante 16 h a temperatura ambiente. Posteriormente, se agregó a cada tubo 4 mL de agua destilada y se esterilizaron en autoclave a 15 psi durante 2 h. Las muestras se ajustaron a pH 7 con NaOH 10 N tras enfriarse. Se añadió una alícuota de 200 µL de acetilacetona (1 mL de acetilacetona en 50 mL de $Na_2CO_3$ 0,5 N) a 200 µL de cada solución de muestra y se incubó en baño maría a 96 °C durante 20 min. Tras enfriarse, se añadieron 2 mL de etanol al 96 % y 200 µL de reactivo Erlich (1,6 g de 4-(dimetilamino) benzaldehído (ACS, 99 %; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.) en 60 mL de HCl:EtOH, 1:1) y se agitó en vórtex (Figura 6). Una hora después, se obtuvo la absorbancia a 530 nm. Se obtuvo una curva estándar de 0–200 µg $mL^{-1}$ con glucosamina (clorhidrato de d-(+)-glucosamina; Sigma-Aldrich) como estándar (Figura 5).

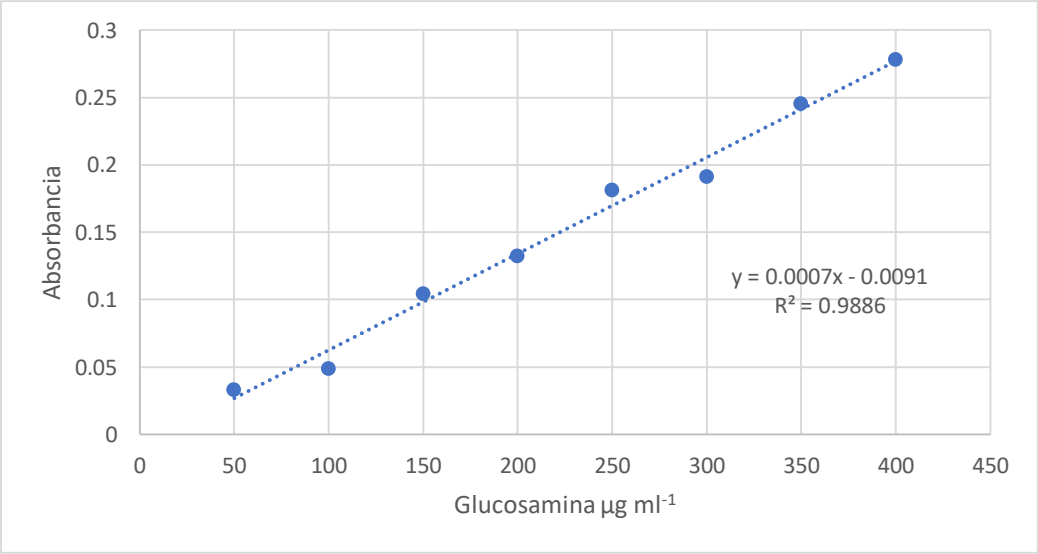


**Figura 5.** Curva estándar de 0–200 µg mL−1 con glucosamina y ecuación de la recta.

**Figura 6.** Proceso para la determinación de glucosamina en raíz.

### 3.9. Análisis estadístico

Los datos (variables de crecimiento de la planta y contenido de glucosamina y elementos) se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando un diseño completamente aleatorizado con 11 tratamientos mostrados en el Cuadro 1. Para determinar las diferencias entre los tratamientos, se utilizaron pruebas de medias mediante la prueba de separación de rangos múltiples de Duncan con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico R 2.15.3 (R Core Team, 2013).

# 4. RESULTADOS

## 4.1. Variables morfológicas evaluadas

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados al analizar la variable longitud de raíz, sin embargo, para las demás variables morfológicas evaluadas, se encontraron diferencias altamente significativas en todos los tratamientos respecto al testigo y al control positivo (tierra de monte). Se encontró que el tratamiento T10 (*Endoradiciella communis*) generó los valores más elevados de altura de la planta siendo estadísticamente superior a todos los demás tratamientos, los valores más bajos registrados para esta variable fueron TM (tierra de monte), T0 (control negativo) y T2 (*Nectriella pironii*). Así mismo, el T10 y T4 (*Pochonia chlamydosporia*), fueron los tratamientos que promovieron la mayor acumulación de biomasa fresca del tallo (Cuadro 2) observándose un patrón similar cuando se determinó la biomasa seca.

**Cuadro 2.** Resultados de altura total, fuste y diámetro del cuello, en tratamientos con distintas cepas de inoculo en el crecimiento de *Pinus cembroides.*

| Tratamiento | Altura (cm) | Fuste (cm) | Diametro (mm) |
|---|---|---|---|
| T0 | 19.56±1.06 $^{e}$ | 3.33±0.37 $^{e}$ | 4.40±0.71 $^{a}$ |
| T1 | 19.56±0.50 $^{e}$ | 3.99±0.59 $^{bcde}$ | 3.65±0.36 $^{bc}$ |
| T2 | 21.33±0.61 $^{bcd}$ | 4.23±0.60 $^{abcd}$ | 3.77±0.51 $^{abc}$ |
| T3 | 21.62±0.18 $^{bc}$ | 4.23±0.56 $^{abcd}$ | 4.02±0.30 $^{abc}$ |
| T4 | 20.70±0.60 $^{cd}$ | 3.82±0.18 $^{cde}$ | 4.34±0.36 $^{a}$ |
| T5 | 20.35±0.85 $^{de}$ | 4.39±0.75 $^{abc}$ | 3.87±0.54 $^{abc}$ |
| T6 | 21.36±0.51 $^{bcd}$ | 3.54±0.28 $^{de}$ | 4.09±0.36 $^{abc}$ |
| T8 | 20.55±0.27 $^{d}$ | 3.75±0.14 $^{cde}$ | 3.59±0.11 $^{bc}$ |
| T9 | 21.81±0.53 $^{b}$ | 4.64±0.16 $^{ab}$ | 4.13±0.26 $^{ab}$ |
| T10 | 23.75±1.02 $^{a}$ | 4.79±0.30 $^{a}$ | 4.21±0.36 $^{ab}$ |
| TM | 16.46±0.22 $^{f}$ | 3.73±0.24 $^{cde}$ | 3.46±0.11 $^{c}$ |
| P>F | 5.48e-14 $^{***}$ | ·000487 $^{***}$ | 0.0292 * |

No se encontraron diferencias significativas en el diámetro del tallo de la mayoría de los tratamientos respecto al testigo absoluto, los tratamientos T2, T8 y TM fueron los que registraron menor diámetro. Para la longitud del fuste, como indicador de crecimiento, se encontró que los tratamientos que presentaron mayor longitud respecto al T0 y TM fueron el T10, T9, T5, T3 y T2.

En cuanto al crecimiento radicular, tanto el T10 y T4 mostraron los valores más altos. El peso fresco de raíz como el peso seco fueron significativamente más altos que el resto de los tratamientos. Esto concuerda con los niveles de glucosamina en raíz, ya que tanto el tratamiento el T3, T8 y T10 presentaron los valores más elevados (356.54, 359.89 y 355.03 µg/g respectivamente) sugiriendo que fueron más efectivos para promover simbiosis con las raíces (Cuadro 3 y Figura 7).

**Cuadro 3.** Resultados de pesos seco total, peso fresco de raíz, peso seco de raíz y glucosamina, en tratamientos con distintas cepas de inoculo en el crecimiento de *Pinus cembroides*.

| **Tratamiento** | **PFT (g)** | **PST (g)** | **PFR (g)** | **PSR (g)** | **Glucosamina (µg/g)** |
|---|---|---|---|---|---|
| T0 | 4.03±0.42 $^{cd}$ | 1.48±0.15 $^{c}$ | 0.60±0.08 $^{c}$ | 0.33±0.06 $^{c}$ | 228.23±10.72 $^{b}$ |
| T1 | 4.07±0.67 $^{cd}$ | 1.33±0.17 $^{c}$ | 0.72±0.13 $^{bc}$ | 0.39±0.06 $^{bc}$ | 139.19±5.40 $^{c}$ |
| T2 | 4.33±0.90 $^{cd}$ | 1.46±0.33 $^{c}$ | 0.64±0.24 $^{c}$ | 0.37±0.07 $^{c}$ | 242.52±13.27 $^{b}$ |
| T3 | 5.09±0.20 $^{bc}$ | 1.60±0.08 $^{bc}$ | 0.84±0.02 $^{abc}$ | 0.38±0.01 $^{bc}$ | 356.54±16.42 $^{a}$ |
| T4 | 5.61±0.472 $^{ab}$ | 1.86±0.26 $^{ab}$ | 1.11±0.16 $^{a}$ | 0.51±0.05 $^{ab}$ | 205.38±24.08 $^{bc}$ |
| T5 | 4.74±1.09 $^{bc}$ | 1.56±0.38 $^{bc}$ | 0.86±0.39 $^{abc}$ | 0.45±0.19 $^{bc}$ | 243.00±11.15 $^{b}$ |
| T6 | 4.47±0.49 $^{c}$ | 1.42±0.14 $^{c}$ | 0.95±0.13 $^{ab}$ | 0.45±0.08 $^{bc}$ | 241.52±5.09 $^{b}$ |
| T8 | 4.23±0.70 $^{cd}$ | 1.35±0.20 $^{c}$ | 0.72±0.13 $^{bc}$ | 0.38±0.08 $^{bc}$ | 359.92±44.28 $^{a}$ |
| T9 | 4.70±0.89 $^{bc}$ | 1.57±0.29 $^{bc}$ | 0.78±0.24 $^{bc}$ | 0.47±0.11 $^{bc}$ | 236.80±25.72 $^{b}$ |
| T10 | 6.14±0.71 $^{a}$ | 2.04±0.23 $^{a}$ | 1.13±0.11 $^{a}$ | 0.61±0.03 $^{a}$ | 365.09±17.85 $^{a}$ |
| TM | 3.27±0.24 $^{d}$ | 1.22±0.04 $^{c}$ | 0.98±0.09 $^{ab}$ | 0.64±0.03 $^{a}$ | 217.76±38.60 $^{b}$ |
| P>F | 0.000147 $^{***}$ | 0.00104 $^{**}$ | 0.00235 $^{**}$ | 0.000134 $^{***}$ | 5.28e-11 $^{***}$ |

PFT= Peso fresco del tallo; PST= Peso seco del tallo; PFR= Peso fresco de raíz, PSR= Peso seco de la raíz, T0= control, T1= *Dactylonectria alcacerensis*; T2= *Nectriella pironii*, T3= *Phialophora livistonae.*, T4= *Pochonia chlamydosporia*, T5= *Helotiales* sp., T6= *Cadophora* sp., T8= *Pochonia* sp., T9= *Thelonectria veuillotiana,* T10= *Endoradiciella communis*; TM= suelo.

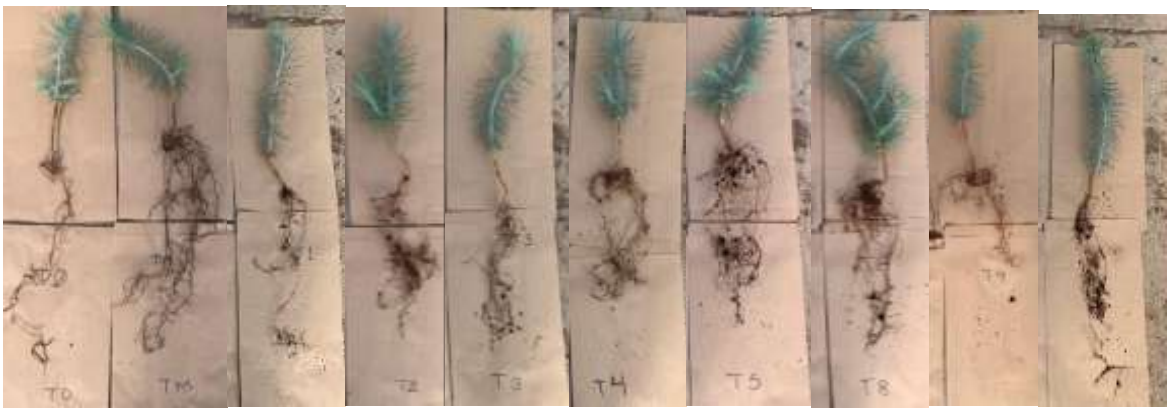


**Figura 7.** Comparación de los diferentes tratamientos de hongos endóftios evaluados con relación a la longitud de de la raíz y altura de la planta. TM= tierra de monte, T0= control, T1 = *Dactylonectria alcacerensis*, T2= *Nectriella pironii,* T3= *Phialophora livistonae*, T4= *Pochonia chlamydosporia,* T5= *Helotiales* sp., T6= *Cadophora* sp., T8= *Pochonia* sp., T9= *Thelonectria veuillotiana*, T10= *Endoraciella communis.*

### 4.2. Absorción de nutrientes

Los hongos aplicados demostraron ser efectivos en la movilización de nutrientes ya que superaron al tratamiento TM y control en la movilización de fósforo, azufre y nitrógeno. Se encontró que el hongo *Endoraciella communis* y TM mostraron el contenido más alto de carbono (Cuadro 4). En cuanto al elemento Calcio, no se encontraron diferencias significativas en TM y la aplicación de hongos *Endoraciella communis*, *Nectriella pironii*, *Pochonia* sp., *Cadophora* sp. y *Helotiales* sp. Todos los hongos inoculados presentaron concentraciones de P significativamente más altas que el testigo TM (p=2.57e-06 *) y, en la mayoría de los casos, que el control. Los mejores tratamientos antes mencionados casi triplicaron el contenido de P en comparación a TM, este mismo patrón se encontró en la variable S en el cual TM acumuló los valores más bajos. Para el nitrógeno los tratamientos *Pochonia* sp., *Nectriella pironii* y *Endoraciella communis* mostraron los valores más altos siendo significativamente superiores al control y TM. Para la variable K todos los tratamientos evaluados fueron significativamente más altos (1.15-1.43 %) que TM (0.70 %); sin embargo, el hierro fue más alto en TM (0.036 %) que el resto de los tratamientos (0.004-0.015 %). No se encontraron diferencias significativas en la movilización de boro (0.005-0.009 %) y manganeso (0.01-0.02 %) entre los tratamientos evaluados.

**Cuadro 4.** Efecto de diferentes inoculaciones con hongos endófitos sobre el contenido de nutrientes de plántulas de *Pinus cembroides*. Los valores representan la media ± error estándar de cuatro réplicas (la unidad experimental fueron cinco plántulas). Las medias dentro de una columna seguidas por la misma letra superíndice no presentan diferencias significativas.

| Tratamiento | Calcio | Fósforo | Azufre | Carbono | Nitrógeno |
|---|---|---|---|---|---|
| Control | 1.27±0.37$^{bc}$ | 0.52±0.07$^{cd}$ | 0.36±0.01$^{bc}$ | 44.42±0.81$^{c}$ | 3.67±0.07$^{c}$ |
| *Cadophora sp.* | 1.82±0.20$^{a}$ | 0.67±0.07$^{ab}$ | 0.51±0.05$^{a}$ | 45.33±2.19$^{bc}$ | 4.14±0.30$^{abc}$ |
| *Dactylonectria alcacerensis* | 1.31±0.27$^{bc}$ | 0.59±0.02$^{abcd}$ | 0.38±0.08$^{bc}$ | 43.91±1.04$^{c}$ | 3.73±0.017$^{bc}$ |
| *Endoraciella communis* | 1.51±0.35$^{abc}$ | 0.65±0.09$^{abc}$ | 0.45±0.11$^{abc}$ | 49.97±8.71$^{ab}$ | 4.39±0.29$^{a}$ |
| *Helotiales* sp. | 1.72±0.18$^{ab}$ | 0.65±0.11$^{abc}$ | 0.46±0.05$^{abc}$ | 44.10±0.71$^{c}$ | 3.90±0.35$^{abc}$ |
| *Nectriella pironii* | 1.88±0.13$^{a}$ | 0.71±0.05$^{a}$ | 0.55±0.08$^{a}$ | 43.71±2.04$^{c}$ | 4.27±0.36$^{a}$ |
| *Pochonia* sp. | 1.32±0.11$^{bc}$ | 0.53±0.06$^{bcd}$ | 0.34±0.04$^{c}$ | 45.10±0.$^{42bc}$ | 3.62±0.21$^{c}$ |
| *Phialophora livistonae* | 1.07±0.29$^{c}$ | 0.51±0.09$^{d}$ | 0.34±0.02$^{c}$ | 44.83±0.58$^{bc}$ | 3.85±0.39$^{abc}$ |
| *Pochonia chlamydosporia* | 1.66±0.25$^{ab}$ | 0.60±0.05$^{abcd}$ | 0.47±0.07$^{ab}$ | 45.28±1.15$^{bc}$ | 4.23±0.33$^{ab}$ |
| *Thelonectria veuillotiana* | 1.24±0.31$^{bc}$ | 0.50±0.08$^{d}$ | 0.36±0.02$^{bc}$ | 44.30±1.07$^{c}$ | 3.61±0.04$^{c}$ |
| Suelo forestal | 1.54±0.08$^{abc}$ | 0.20±0.02$^{e}$ | 0.08±0.03$^{d}$ | 52.74±0.34$^{a}$ | 3.69±0.36$^{bc}$ |

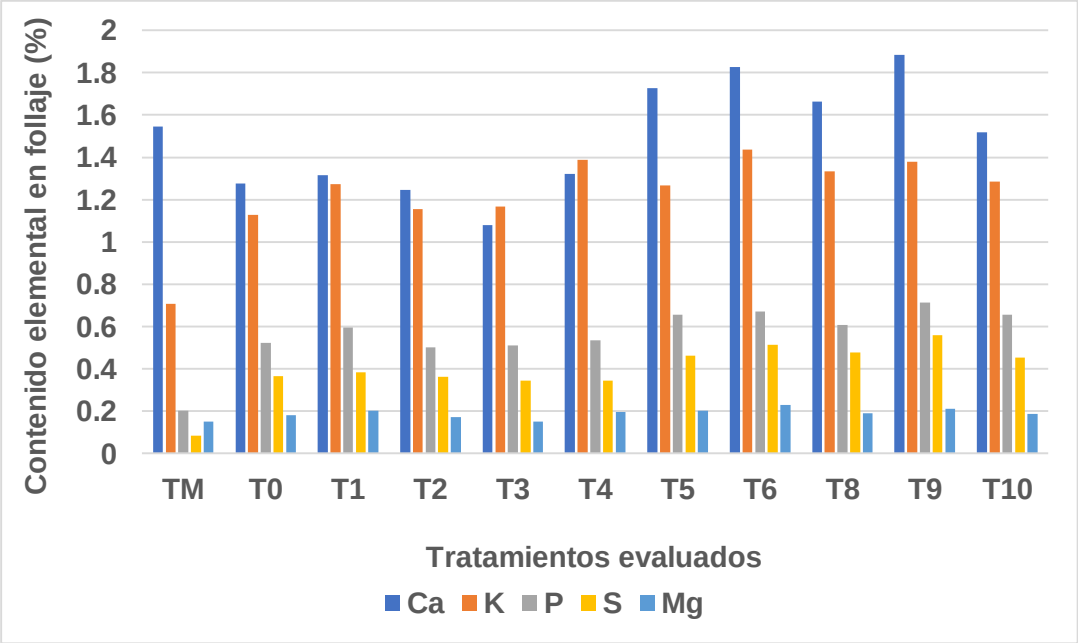


**Figura 8.** Contenido de absorción de nutrientes (%) en las plántulas de *Pinus cembriodes* inoculadas con hongos endófitos. *TM= tierra de monte, T0= control, T1= Dactylonectria alcacerensis, T2= Nectriella pironii, T3= Phialophora livistonae, T4= Pochonia chlamydosporia, T5= Helotiales sp., T6= Cadophora sp., T8= Pochonia sp., T9= Thelonectria veuillotiana, T10= Endoraciella communis.*

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la inoculación con hongos endófitos promovió significativamente el crecimiento y la acumulación de biomasa en plántulas de *P. cembroides*, con diferencias marcadas entre los distintos aislamientos fúngicos. La mayor altura, diámetro de fuste y peso fresco total (PFT) se registraron en las plántulas inoculadas con *Endoradiciella communis*, que alcanzaron 23.75 ± 1.02 cm de altura y 6.14 ± 0.71 g de peso total, seguidas por *Pochonia chlamydosporia* y *Nectriella pironii*, mientras que el tratamiento con suelo de monte (TM) y el testigo presentaron los valores más bajos. Esto sugiere que *E. communis* ejerce un efecto promotor del crecimiento, posiblemente mediante la producción de reguladores hormonales (auxinas, giberelinas) y la mejora en la absorción de nutrientes, como se ha documentado en coníferas inoculadas con endófitos del orden Helotiales (Baron y RIgobelo, 2022).

El contenido de glucosamina, indicador de la colonización fúngica interna, fue más alto en plántulas inoculadas con *E. communis* (365.09 ± 17.85 µg $g^{-1}$), *Pochonia* sp. (359.92 ± 44.28 µg $g^{-1}$) y *Phialophora livistonae* (356.54 ± 16.42 µg $g^{-1}$), lo que sugiere una estrecha asociación simbiótica entre el hongo y los tejidos radiculares. Este incremento en la colonización podría estar vinculado con el aumento del crecimiento y la biomasa (Hicks y Newell, 1984), como se ha observado en otras especies forestales donde la densidad micelial correlaciona positivamente con la eficiencia fotosintética y la acumulación de materia seca (Tedersoo y Bahram, 2019). De manera general, los resultados evidencian que la respuesta de *P. cembroides* depende del tipo de endófito, destacando *E. communis* y *P. chlamydosporia* como promotores potenciales del crecimiento y desarrollo de plántulas. Estos hallazgos indican que los hongos endófitos nativos pueden desempeñar un papel ecológico relevante en la producción de planta forestal de calidad y la restauración de ecosistemas áridos o contaminados, al mejorar tanto la absorción de nutrientes como la tolerancia fisiológica del hospedero (Elsheikh et al., 2021).

Por lo tanto, los hongos endófitos constituyen un componente biológico clave para promover la sanidad y el vigor de las plantas hospederas. Diversos estudios han demostrado que estos microorganismos contribuyen significativamente al potencial adaptativo de las plantas frente

a condiciones ambientales adversas, tales como estrés hídrico, salinidad, estrés oxidativo, acidez del suelo y la presencia de insectos o patógenos. La interacción simbiótica establecida entre las plantas y los hongos endófitos favorece el desarrollo integral del hospedero, lo cual se refleja en mayores tasas de germinación y enraizamiento, incremento de la biomasa en los tejidos y una mayor producción de semillas. En el ámbito forestal, este tipo de asociaciones adquiere especial relevancia, ya que los hongos endófitos no solo promueven de forma directa el crecimiento de los árboles, sino que también fortalecen su estado fitosanitario al incrementar la tolerancia al estrés y reducir la incidencia de agentes patógenos (Uvidia, 2021).

El análisis elemental del tejido foliar mostró variaciones significativas en la concentración de macronutrientes entre los tratamientos inoculados con hongos endófitos. Este patrón sugiere una diferente capacidad de los endófitos para modular la absorción y translocación de nutrientes minerales, posiblemente mediante la producción de sideróforos, ácidos orgánicos o enzimas fosfatasas que mejoran la disponibilidad de nutrientes en suelo rizosférico (Sharma et al., 2023).

La composición de las comunidades de los hongos endófitos exhibió una variación considerable entre diferentes partes del tejido hospedante, con diferentes rasgos funcionales, tal es el caso de los endófitos que se encuentran en la raíz, estos podrían influir directamente en la absorción de nutrientes y la arquitectura radicular; sin embargo, comprender las variaciones de los hongos endófitos en diversos tejidos del hospedante es crucial para descifrar la intricada dinámica de las planta-microbio, estos microorganismos además de actuar como antagonistas de patógenos potenciales, producen metabolitos con actividad antifúngica (Ren et al., 2024); dicha interacción entre estos organismos produce una un cambio oxidativo entre endófitos y plantas, lo que da lugar a la adquisición de nutrientes por parte de la planta (Verma et al., 2021).

# 6. CONCLUSIONES

Las aplicaciones de los tratamientos en las plántulas demostraron que la inoculación con hongos endófitos tuvo un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de *Pinus cembroides*.

Los tratamientos con *Endoradiciella communis* y *Pochonia chlamydosporia* promovieron un incremento notable en la biomasa fresca y seca del tallo y raíz, así como en la altura total de las plántulas.

En relación con la absorción de nutrientes, los hongos inoculados mejoraron significativamente la movilización de fósforo, azufre y nitrógeno en comparación con el testigo y el tratamiento con suelo forestal.

Los resultados destacan la relevancia de incorporar hongos endófitos benéficos durante la fase de producción en vivero, dado que su inoculación favorece la absorción de nutrientes y promueve un desarrollo fisiológicamente más robusto en *Pinus cembroides,* misma que garantiza su supervivencia.

## 7. RECOMENDACIONES

- De los tratamientos aplicados es recomendable priorizar la inoculación con *Endoradiciella communis*, ya que estos muestran un efecto en el crecimiento morfológico y en la absorción de nutrientes en las plántulas de *Pinus cembroides.*
- Cada inoculación actuó de distintas formas en la plántula de *Pinus cembroide*s lo que permite crear un programa de biofertilización basados en un consorcio endófito, teniendo en combinación *Endoradiciella communis, Phialophora livistonae* y *Phochonia sp.*
- De acuerdo a los resultados es importante a integrar hongos endófitos en los programas de reforestación, empezando con una inoculación temprana desde el vivero o invernadero.

## 8. BIBLIOGRAFÍA


Aceves-Rangel, L.D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., Nájera-Luna, J. A.,(2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, *52*(7), 1043–1057. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000701043

Aragón, S. & Beltran Acosta C. (2018). Los hongos endófitos en el control biológico de fitopatógenos e insectos plaga. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)*. Obtenido de: https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/31ca9425-59a8-4d5b-849e-7b90c89058d1/content

Armendariz Guillen B. (2013). Hongos endofitos productores de metabolitos secundarios con potencial fitotoxico y antifungico. Obtenido de Tesis de licenciatura. Facultad de Quimica. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, D.F: https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/cf4b7448-e284-4fa3-8cc9-f1134626070d/content

Baeza-Guzman, Y., Vasquez Jimenez M. S., Morgado Viveros E., Sanchez Landero L. A., Trejo Aguilar D. (2025). Ectomycorrhizal Fungi Associated with *Pinus cembroides* subsp. orizabensis, an Endemic Pine in the Arid Zones of the Oriental Basin, Puebla, Mexico. *Journal of Fungi*, *11*(9), 1-3.: Disponible en: https://doi.org/10.3390/jof11090677

Baron, N. C., & Rigobelo, E. C. (2021). *Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture. Mycology, 13*(1), 39–55. Disponible en: https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699

Bernaola Paucar, R. M., Ruiz Blandon, B., Salcedo Pérez, E., & Zapata Hernández, I. (2022). Factores de manejo en vivero que influyen sobre crecimiento y supervivencia de Pinus douglasiana en México. *Bosque (Valdivia)*, *43*(2), 101–115. https://doi.org/10.4067/s0717-92002022000200101

Carrell, A. A., & Frank, A. C. (2014). *Pinus flexilis* and *Picea engelmannii* share a simple and consistent needle endophyte microbiota with a potential role in nitrogen fixation. *Frontiers in Microbiology*, *5*, 333–333. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00333

CONAFOR. (2018). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales* . Obtenido de Inventario Nacional Forestal y de Suelos.Informe de Resultados 2009-2014: https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf

CONAFOR. (2020). *Estado que Guarda el Sector Forestal en México*. Obtenido de Bosques para el bienestar social y climático:

http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7825El%20Estado%20que%20guarda%20el%20Sector%20Forestal%20en%20M%c3%a9xico%202020.pdf

CONAFOR. (2024). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.* Obtenido de Estado que guarda el Sector Forestal en México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/947878/2024_07_31_EGSFM_2023.pdf

CONAFOR. (2025). *Obtenido de SIRE-Paquetes Tecnológicos*. Obtenido de *Pinus cembroides* Zucc: recuperado de http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf

Constante García V., Villanueva Díaz F., Cerano Paredes J., Cornejo Oviedo E. H. y Valencia Manzo S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México, 34*(106). Obtenido de: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000200002

Cruz Cárdenas C. I., Zelaya Molina L.X., Sandoval Cancino G., De los Santos Villalobos S., Rojas Anaya E., Chávez Díaz I. F. & Ruíz Ramírez S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12*(*5)*. Obtenido de: https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v12n5/2007-0934-remexca-12-05-899.pdf

Doty Sharon L. (2011). *Growth-Promoting Endophytic Fungi of Forest Trees.* book: Endophytes of Forest Trees (pp.151-156): Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1599-8_9

Del Castillo A. & Gomez Duran T. (2020). Tala ilegal inunda el mercado de la madera en México *Noticias Ambientales.* MONGABAY. Disponible en: https://es.mongabay.com/2020/09/mexico-tala-ilegal-gana-terreno-en-el-mercado-de-la-madera/

Moctezuma López G. & Flores A. (2020). *Importancia económica del pino (Pinus spp.) como recurso natural en México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/720/2189

González Orozco M.M., Prieto Ruíz J.A., Aldrete A., Hernández Díaz J.C., Chávez Simental J. A. & Rodríguez Laguna R. (2018). Sustratos a base de aserrín crudo con fertilización y la calidad de planta de *Pinus cooperi* Blanco en vivero. Obtenido de: *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 9(48*)*. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/download/125/1629?inline=1

Meza, Hernández G. (2022). *Deforestación y debilitamiento de la organización comunitaria, consecuencias de Sembrando Vida*. Obtenido de Resonancias, Blog del Instituto de

Investigaciones Sociales de la UNAM. https://www.iis.unam.mx/blog/deforestacion-y-debilitamiento-de-la-organizacion-comunitaria-consecuencias-de-sembrando-vida/

Löewe, Muñoz, V., & Delard Rodríguez, C. (2024). Esquemas de Manejo para el Cultivo de Pino Piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, *30*(1), 17–28. https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.604

Martinez, A. R., Diaz, J. V., Manzanilla Quiñones U., Becerra López, J. L., Hernández Herrera J. A., Estrada Ávalos, J., & Velázquez Pérez A. H. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm (Pinaceae): A species conservation proposal in Mexico. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-25149/v1

Graf, Montero S. (2024). *Deforestación en México. Propuestas para una Agenda Nacional.* Obtenido de Pronatura Sur. https://pronatura-sur.org/wp-content/uploads/2024/10/Deforestacion-en-Mexico.-Propuestas-para-una-agenda-nacional.pdf

Muñoz, Flores M. (2020). *Estudio de biocontrol de endófitos y rizobacterias sobre hongos endófitos cultivables de semillas de Pinus chiapensis.* Tesis de Maestria. Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas. Laboratorio de Genética Molecular Microbiana. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/b80d8b64-07cb-4590-8895-76325a5675c2/content

Nava, Rueda J. L. (2024). Evaluación de calidad de planta de *Pinus patula* schl. et cham. en condiciones de vivero con aplicación de microorganismos de montaña. Tesis Profesional. Complejo Regional Norte, sede Tetela de Ocampo. Programa de Ingeniería Agroforestal. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tetela de Ocampo, Puebla. https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/bc5b9bba-1edd-4aec-b8bb-5bee3939d187/content

Niembro, Rocas A. (2001). Las diásporas de los árboles y arbustos nativos de México: posibilidades y limitaciones de uso en programas de reforestación y desarrollo agroforestal. *Madera y Bosques*, *7*(2), 3-11. https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1308/1478

Ortiz Lopez, I., Martínez Reyes, M., Maurice Lira, J. V., Ramírez Mendoza, R., Balbuena Carrasco, S., & Perez Moreno, J. (2025). Biofertilizantes a base de hongos ectomicorrízicos y bacterias benéficas en la producción de especies de importancia forestal. *Agro-Divulgación, 5*(1). https://doi.org/10.54767/ad.v5i1.458

Pérez-Miranda, R., Velasco-Bautista, E., Romero-Sánchez, M. E., & Hernández-Ramos, J. (2022). Análisis de contingencia de la distribución natural de pinos mexicanos en

categoría de riesgo. *Revista Terra Latinoamericana, 40*. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1043

Prieto Ruiz J.A., Garcia Rodriguez J. L., Mejia Bojorquez J. M., Huichin Alarcon S. & Aguilar Vitelaa J. L. (2009). Produccion de planta del genero *Pinus* en vivero en clima templado frio. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias*. Obtenido de: 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

Qin X., Xu J., An X., Yang J., Wang Y., Dou M., Wang M., Huang J. & Fu Y. (2023). Insight of endophytic fungi promoting the growth and development of woody plants. *Critical Reviews in Biotechnology, 44*(1), 78–99. https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2129579

Ren, N., Wang, L., & You, C. (2024). Diversity, Community Structure, and Antagonism of Endophytic Fungi from Asymptomatic and Symptomatic Mongolian Pine Trees. *Journal of Fungi*, *10*(3), 212. https://doi.org/10.3390/jof10030212

Rodríguez Trejo D. A. & Quiahua Barrera L. (2021). Pinus L. (Pinaceae). *Semillas de Especies Forestales. Dicifo, UACH. Chapingo, Edo. de Méx.*, 223-245.

Sánchez-Fernández, R. E., Sánchez Ortiz, B. L., Sandoval Espinosa Y. K. M., Ulloa Benítez A., Armendáriz-Guillén, B., García-Méndez M. C. & Macías-Rubalcava, M. L. (2013). Hongos endófitos: fuente potencial de metabolitos secundarios bioactivos con utilidad en agricultura y medicina. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *16*(2), 132–146. https://doi.org/10.1016/s1405-888x(13)72084-9

Sánchez-González, A. (2025). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera Y Bosques*, *14*(1), 107–120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712008000100008&script=sci_arttext

Sandoval Mendez C. (1998). Sustratos y polimeros en la produccion de planta de *Pinus cembroides* Zucc. bajo condiciones de invernadero(Tesis de Maestria). Universidad Autónoma de San Luis Potosi. Facultad de Agronomia. https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3256/MCA1SUS99801.pdf?sequence=1

Sponsel, Valerie M. (2023). *Plant Metabolites: primary vs. secondary.* EBSCO Knowledge Advantage: https://www.ebsco.com/research-starters/anatomy-and-physiology/plant-metabolites-primary-vs-secondary

Stuart, E. K., Monk, M., Green, P., Anderson, I. C., Carnegie, A., Plett, J. M., & Plett, K. L. (2023). Mycocentric fertilisation of ectomycorrhizae-inoculated *Pinus radiata* during

containerised production alters root microbiome and growth outcomes. *Australian Forestry*, *86*(3–4), 110–128. https://doi.org/10.1080/00049158.2023.2273159

Sudha, V., Govindaraj, R., Baskar, K., Al-Dhabi, N. A., & Duraipandiyan, V. (2016). Biological properties of Endophytic Fungi. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *59*(0). https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016150436

Torres González, R., Delgado-Valerio, P., Pineda Pineda, J., Manzanilla Quiñones, U., Pedraza Santos, M. E., & Saénz Romero, C. (2025). Implementación de un sistema nutricional para el desarrollo de *Pinus cembroides* Zucc. en Uruapan, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *16*(90), 61–86. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i90.1535

Uvidia Calles A. C. (2021). Estudio de la diversidad de hongos endófitos asociada a la endósfera foliar de especies forestales nativas y exóticas usando técnicas dependientes de cultivo. Tesis de licenciatura. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Recursos Naturales. Riobamba, Ecuador. https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/87c5628f-bbd1-4baa-a674-cbd358db0b48/content

Casique-Valdés R., García Galindo F., Flores Renteria D., Renteria, L. F.,Benavides Mendoza, A., Tedersoo L. & Gonzalez Morales S. (2025). Community of ectomycorrhizae associated with Mexican pinyon pine (*Pinus cembroides*) in northeastern Mexico and its relationships with environmental variables. *Forest Ecology and Management*, *598*, 123237–123237. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123237

Verma, S. K., Sahu, P. K., Kumar, K., Pal, G., Gond, S. K., Kharwar, R. N., & White, J. F. (2021). Endophyte roles in nutrient acquisition, root system architecture development and oxidative stress tolerance. *Journal of Applied Microbiology*, *131*(5), 2161– 2177. Disponible en: https://doi.org/10.1111/jam.15111

Xu L., Li, Y., Dai, X., Jin, X., Zhao, Q., Tian, B., & Zhou, Y. (2025). Symbiotic fungal inoculation promotes the growth of *Pinus tabuliformis* seedlings in relation to the applied nitrogen form. *Plant Biology, 25*(1), 10–10. Disponible en: https://doi.org/10.1186/s12870-024-05883-y