



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

T E S I S

**INOCULACIÓN MICORRÍZICA Y SU EFECTO EN
LA CALIDAD DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN
CONDICIÓN DE VIVERO**

Para obtener el título de
Licenciada en Ingeniería Forestal

PRESENTA
Lucia Serafina González Álvarez

DIRECTOR
Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

CODIRECTOR
Dr. Ramón Razo Zárate

Santiago Tulantepec, Hidalgo, agosto de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

T E S I S

**INOCULACIÓN MICORRÍZICA Y SU EFECTO EN
LA CALIDAD DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN
CONDICIÓN DE VIVERO**

Para obtener el título de

Licenciada en Ingeniería Forestal

PRESENTA

Lucia Serafina González Álvarez

COMITÉ

Director

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Codirector

Dr. Ramón Razo Zárate

Asesores

Dra. Juana Fonseca González

Dr. Alfonso Suárez Islas

Dra. Nallely Trejo González

Santiago Tulantepec, Hidalgo, agosto de 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales

Academic Area of Agricultural and Forestry Sciences

Tulancingo de Bravo, Hidalgo; a 18 de agosto de 2025

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Ingeniería Forestal, **Lucia Serafina González Álvarez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Inoculación micorrízica y su efecto en la calidad de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condición de vivero"**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE: Dra. Juana Fonseca González

SECRETARIO: Dr. Alfonso Suárez Islas

VOCAL 1: Dra. Nallely Trejo González

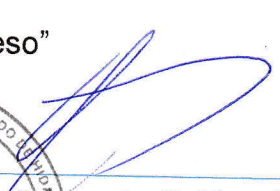
SUPLENTE 1: Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"



Dr. José González Ávalos
Coordinador del Programa Educativo
en Ingeniería Forestal

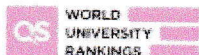


Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775.
Teléfono: 7717172001 Ext. 42173
profe_5566@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025

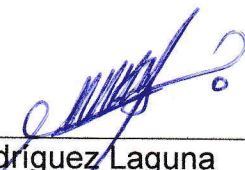


uaeh.edu.mx

La presente tesis titulada: **"Inoculación micorrízica y su efecto en la calidad de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condición de vivero"** realizada por la pasante **Lucia Serafina González Álvarez**, bajo la dirección del Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna y Codirector Dr. Ramón Razo Zárate y el comité asesor indicado, ha sido aprobada por los mismos y aceptada como requisito parcial para obtener el título de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA FORESTAL

Comité asesor



Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna
Director



Dr. Ramón Razo Zárate
Codirector



Dra. Juana Fonseca González
Asesora



Dr. Alfonso Suárez Islas
Asesor





Dra. Nallely Trejo González
Asesora

Santiago Tulantepec, Hidalgo, agosto de 2025.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Joel Meza Rangel, por el valioso conocimiento, enseñanzas, apoyo incondicional a lo largo de todo el proceso de elaboración de este documento. Gracias por su dedicación y por estar siempre pendiente de mí, acompañándome en este camino que, aunque desafiante, ha sido enriquecedor.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna, por su disponibilidad, dedicación y apoyo constante en realización de este trabajo, así como las revisiones y sugerencias que realizó, las cuales contribuyeron significativamente el presente documento.

Al Dr. Ramón Razo Zárate, por compartir sus conocimientos y experiencias, por transmitir su entusiasmo por la carrera, lo que genera en quienes lo escuchamos el deseo de profundizar más en ella. Además, agradezco por las sugerencias durante la revisión del presente documento.

A la Dra. Juana Fonseca González, por su disponibilidad y apoyo durante todo el proceso. Aprecio enormemente las sugerencias y consejos que me han permitido concluir exitosamente este trabajo.

Al Dr. Alfonso Suárez Islas, por su valiosa participación en la revisión del presente documento, gracias a sus observaciones y recomendaciones porque ayudaron a enriquecer el presente trabajo.

A la Dra. Nallely Trejo González, por su participación en la revisión con sus observaciones y recomendaciones ayudaron a mejorar el presente trabajo.

A la Dra. Juana Juárez Muñoz, por la disponibilidad durante el análisis de datos, así como por prestarme su microscopio óptico equipado con cámara digital y por el espacio que me brindó en su laboratorio para llevar a cabo mis análisis.

A los laboratorios de semillas y germoplasma, botánica y biotecnología que me proporcionaron un espacio para obtener los resultados que sustentan este trabajo.

A mis compañeros y amigos que hicieron que la distancia con mi familia fuera más amena, por su apoyo, enseñanzas y la confianza que me otorgaron.

DEDICATORIAS

A Dios

A mis padres la Sra. Domitila Álvarez Gómez y el Sr. Hilario González Riveros, por su incondicional esfuerzo, tiempo y sacrificios en mi educación, un sacrificio que a pesar de mi gratitud jamás podré recompensar.

A mis hermanos Jesús y Miguel, por su apoyo constante tanto emocional como económico durante todo mi proceso académico, reconozco que al igual que mis padres ni el tiempo ni los recursos podrán compensar todo lo que me han brindado a lo largo de este período.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
RESUMEN	XII
SUMMARY	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Hipótesis	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Producción de plántula en viveros comerciales en México.....	4
2.1.1 Sustratos que se utilizan en viveros.....	4
2.1.2 Producción de pinos en vivero	5
2.1.3 Práctica de fertilización.....	6
2.2 Micorrizas	9
2.2.1 Tipos de micorrizas	9
2.2.2 Relación micorriza-fertilizante y micorriza-planta producida en vivero.....	10
2.2.3 Efectos de la ectomicorriza en la nutrición de las plántulas	11
2.2.4 Inoculación de micorriza en plantas de vivero.....	11
2.2.5 Importancia de las ectomicorrizas en el desarrollo de <i>Pinus</i>	12
2.2.6 Disminución de enfermedades en árboles de pino con el uso de micorrizas	13
2.2.7 Efecto de la micorriza en la fisiología de la plántula	14
2.2.8 Uso de hongos ectomicorrízicos para favorecer la supervivencia de <i>Pinus pseudostrobus</i> en condiciones adversas.....	14
2.3 Evaluación de calidad de plántula producida en vivero	15
2.4 Características de las especies estudiadas	16

2.4.1	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	16
2.4.1.1	Características generales	16
2.4.1.2	Clasificación taxonómica	17
2.4.1.3	Forma biológica	17
2.4.1.4	Origen y distribución en México	18
2.4.1.5	Importancia	18
2.4.2	<i>Pisolithus arhizus</i>	18
2.4.2.1	Características generales	18
2.4.2.2	Clasificación taxonómica	19
2.4.2.3	Ecología	19
2.4.2.4	Estructura y función	19
2.4.2.5	Importancia	20
3.	MATERIALES Y METODOS	21
3.1	Ubicación del área de estudio	21
3.2	Semilla e inoculante	21
3.2.1	Procedencia de semilla	21
3.2.2	Producto ectomicorrízico comercial	22
3.2.3	Fertilizante Multicote Agri®	23
3.3	Diseño experimental y tratamientos	24
3.4	Ejecución del experimento	24
3.4.1	Composición del medio de crecimiento	24
3.4.2	Lavado y desinfectado de charolas	24
3.4.3	Preparación del sustrato	25
3.4.4	Método de inoculación	25
3.4.5	Aplicación de fertilizante	25

3.4.6	Llenado de tubetes.....	25
3.4.7	Sembrado.....	26
3.4.8	Manejo de plántulas en el vivero.....	27
3.5	Variables evaluadas	27
3.5.1	Porcentaje de emergencia.....	28
3.5.2	Porcentaje de colonización micorrízica.....	28
3.5.3	Altura de plantas.....	31
3.5.4	Diámetro de planta	31
3.5.5	Peso seco de parte aérea y parte radicular	32
3.5.6	Longitud de raíz	33
3.5.7	Índice de Calidad de Dickson (ICD)	33
3.6	Análisis estadístico	33
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1	Porcentaje de emergencia (%)	34
4.2	Porcentaje de colonización <i>Pisolithus arhizus</i> (%)	35
4.3	Respuesta a altura (cm).....	39
4.4	Respuesta a diámetro (mm)	42
4.5	Peso seco.....	45
4.5.1	Peso seco de la parte aérea (g)	45
4.5.2	Peso seco de la parte radicular (g).....	45
4.6	Longitud de raíz (cm)	47
4.7	Índice de calidad de Dickson (ICD)	48
5.	CONCLUSIONES	50
6.	RECOMENDACIONES.....	51
7.	REFERENCIAS.....	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Climatología a nivel mensual, determinadas en Huayacocotla, Veracruz.	21
Cuadro 2. Combinaciones del tratamiento utilizados en el experimento.	24
Cuadro 3. Colonización de <i>Pisolithus arhizus</i> al quinto, séptimo y noveno mes después de la siembra de <i>Pinus pseudostrobus</i> en vivero.	36
Cuadro 4. Análisis factorial indicando el efecto de los factores micorriza, fertilización y su interacción para la variable altura (cm) del primer mes, séptimo mes y el noveno mes.	40
Cuadro 5. Análisis factorial indicando el efecto de los factores micorriza, fertilización y su interacción para la variable diámetro (mm) datos del primero, séptimo y noveno mes.	43
Cuadro 6. Valor promedio de longitud de raíz en plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> producida en vivero con aplicación de micorriza.	47
Cuadro 7. Valores promedio en variables evaluadas en <i>Pinus pseudostrobus</i> de nueve meses de edad.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. tomado de Cruz (2016).	17
Figura 2. <i>Pisolithus arhizus</i> , tomado de Gutiérrez (2014).	20
Figura 3. Semilla de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. almacenada a ± 4 °C por 8 años con 97.5 % de pureza de procedencia de San Rafael Valenzuela, Huayacocotla, Veracruz.	22
Figura 5. Producto fertilizante Multicote Agri ®, el cual contiene nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio, utilizado en el ensayo experimental.	23
Figura 6. Aspecto general del llenado de tubetes (50 % de aserrín, 20 % turba de musgo, 15 % tezontle, 15% vermiculita), utilizados en el ensayo experimental.	26
Figura 7. Semillas de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. sometidas al proceso de remojo en agua a temperatura ambiente por 24 horas.	26
Figura 8. Manejo de especies vegetales no deseadas, a partir del método manual periódico con el objetivo de minimizar la competencia de agua a las plántulas.	27
Figura 9. Aspectos generales de plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.: a) parte aérea y radicular del tratamiento 1-6 kg m ⁻³ ; b) cinco plántulas por tratamientos antes de ser sometidos al lavado de raíz en el noveno mes; c) tratamiento 1-3 kg m ⁻³ en el séptimo mes; d) tratamiento	

1-6 kg m ⁻³ al noveno mes; cajas de Petri con los diferentes tratamientos al séptimo mes e) 1-0 kg m ⁻³ ; f) 1-3 kg m ⁻³ ; g) 1-6 kg m ⁻³	29
Figura 10. h) cajas de Petri con los tratamientos 1-0 kg m ⁻³ , 1-3 kg m ⁻³ , 1-6 kg m ⁻³ al noveno mes del tratamiento; i) microscopio óptico QM25® equipado con cámara digital AmScoop, modelo MD500 para visualizar la ectomicorriza <i>Pisolithus arhizus</i> ; j) tratamiento de 0-6 kg m ⁻³ en donde se verifica que no presentan bifurcaciones por micorrizas; tratamientos correspondientes al noveno mes en donde se observa la presencia de colonización por parte de la micorriza k) 1-0 kg m ⁻³ ; l) 1-3 kg m ⁻³ y m) 1-6 kg m ⁻³	30
Figura 11. Regla graduada al milímetro para medir las plantas de los seis tratamientos en marzo, septiembre y noviembre correspondiendo al primer, séptimo y noveno mes del experimento.	31
Figura 12. Vernier digital marca Mitutoyo® para medir diámetro del tallo de la plántula.	32
Figura 13. Balanza de precisión serie FZ- 5001.....	32
Figura 14. Horno de secado LW -201C.	32
Figura 15. Porcentaje de emergencia de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. en los diferentes tratamientos después de un mes de siembra.....	34
Figura 16. Emergencia de semillas de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. en los diferentes tratamientos después de un mes de siembra.....	35
Figura 17. Imagen típica de las raíces al quinto mes de inoculación correspondiendo al mes de julio 2024 del tratamiento 1-3 kg m ⁻³ en donde no se observó colonización de micorriza.....	36
Figura 18. Aspecto general de raíces de <i>Pinus pseudostrobus</i> con presencia de colonización con <i>Pisolithus arhizus</i> al séptimo mes (septiembre) desde la siembra; a y b) corresponden al tratamiento 1-3 kg m ⁻³ con presencia de micorrización.	37
Figura 19. En el noveno mes correspondiente a noviembre, se presentó la mayor colonización de <i>Pisolithus arhizus</i> en raíces de plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.; a) Tratamiento 1-3 kg m ⁻³ se observa mayor colonización a comparación de b) del tratamiento 1-6 kg m ⁻³	37
Figura 20. <i>Psilocybe mexicana</i>	38
Figura 21. <i>Cyathus olla</i>	38
Figura 22. Altura del tratamiento 0-0 kg m ⁻³ (testigo) en plantas de <i>Pinus pseudostrobus</i>	39
Figura 23. Comparación de plántulas sin y con fertilizante a) color amarillento en plántulas sin fertilizantes 0-0 kg m ⁻³ ; b) plántulas con fertilizantes 0-3 kg m ⁻³	40

Figura 24. Valores promedio de altura en plantas sin micorrizas (0) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) y con micorriza (1) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) de <i>Pinus pseudostrobus</i> evaluados en marzo (1 mes), septiembre (7 meses) y noviembre (9 meses). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas por fecha de evaluación ($p \leq 0.05$).	41
Figura 25. Respuesta de las plantas a los tratamientos de sin y con micorrizas (0, 1) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) en <i>Pinus pseudostrobus</i> evaluados en noviembre (9 meses).	43
Figura 26. Valores promedio para diámetros en los meses de marzo (1 mes), septiembre (7 meses) y noviembre (9 meses). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas por fecha de evaluación ($p \leq 0.05$).	44
Figura 27. Peso seco de la parte aérea (gramos) al noveno mes (noviembre 2024). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).	45
Figura 28. Peso seco de la parte radicular (gramos) al noveno mes (noviembre 2024). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).	46
Figura 29. Longitud de la parte radicular de las plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> en tratamientos con micorriza: a) 1-6 kg m ⁻³ ; b) 1-3 kg m ⁻³ ; c) 1-0 kg m ⁻³	48

RESUMEN

Se realizó un estudio para evaluar la calidad de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condiciones de vivero, considerando dos factores; inoculación micorrízica y fertilización con 3 y 6 kg m⁻³. Las plántulas fueron sembradas y producidas en el vivero forestal del Instituto de Ciencias Agropecuarias, ubicado en la Ciudad Universitaria Tulancingo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se establecieron seis combinaciones de tratamientos, cada tratamiento con 108 plantas dando un total de 648, a las semillas y plantas se les evaluaron siete variables; porcentaje de germinación, porcentaje de colonización micorrízica, altura, diámetro, peso seco de la parte aérea y radicular, longitud de raíz y el índice de calidad de Dickson. Al mes, el tratamiento 1-0 kg m⁻³ presentó el mayor porcentaje de emergencia con 45%. Las alturas y diámetros fueron evaluadas en marzo (1 mes), septiembre (7 meses) y noviembre (9 meses) teniendo los mejores resultados en la última evaluación en las plantas del tratamiento 1-6 kg m⁻³ con 19.8 cm de altura y 3.9 milímetros de diámetro. El peso seco de la parte aérea y radicular se obtuvo en los meses de septiembre y noviembre con 1.2 y 2.6 gramos respectivamente en el tratamiento 1-6 kg m⁻³, los cuales fueron los más altos. La longitud radicular a pesar de ser similar en todos los tratamientos, se observa que el tratamiento 1-6 kg m⁻³ es el que presentó mejor estructura radicular. Para el índice de calidad de Dickson se obtuvo en los meses de septiembre y noviembre para ambos el valor más alto fue para el tratamiento 1-6 kg m⁻³.

Palabras clave: micorrización, crecimiento en vivero, colonización micorrízica, *Pinus pseudostrobus*, emergencia.

SUMMARY

A study was conducted to evaluate the quality of *Pinus pseudostrobus* Lindl. Plants under nursery conditions, considering two factors: mycorrhizal inoculation and fertilization at 3 and 6 kg m⁻³. The seedlings were sown and grown in the forest nursery of the Institute of Agricultural Sciences, located at the University Campus in Tulancingo of the Autonomous University of the State of Hidalgo. Six treatment combinations were established, each with 108 plants, for a total of 648 plants. Seven variables were evaluated in the seed and plants: germination percentage, mycorrhizal colonization percentage, height, diameter, dry weight of shoot and root parts, root length, and Dickson's quality index. After one month, treatment 1-0 kg m⁻³ showed the highest germination percentage at 45 %. Heights and diameters were measured in march (1 month), september (7 months), and november (9 months), with the best results observed in the final evaluation in plants from treatment 1-6 kg m⁻³, which reached 19.8 centimeters in height and 3.9 millimeters in diameter. Shoot and root dry weight were recorded in september and november, with values of 1.2 and 2.6 grams respectively in treatment 1-6 kg m⁻³, the highest among all treatments. Although root structure. The Dickson quality index was measured in september and november, with the highest values recorded for treatment 1-6 kg m⁻³ in both months.

Keywords: mycorrhization, nursery growth, mycorrhizal colonization, *Pinus pseudostrobus*, emergence.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la deforestación representa un desafío significativo y la reforestación se ha convertido en la estrategia clave para combatir el cambio climático, debido a que favorecen la captura de dióxido de carbono, recuperan suelos erosionados y biodiversidad, protegen cuencas hidrológicas y regulan el ciclo de agua. De acuerdo con CONABIO (2019), el *Pinus pseudostrobus* Lindl. se destaca por ser una especie forestal de las más utilizadas para la restauración de suelos deteriorados debido a que es una especie nativa de México que desempeña un papel fundamental en el ecosistema. Este árbol se desarrolla a altitudes que oscilan entre 2400 a 2800 metros sobre el nivel del mar (msnm), es relevante debido a que se encuentra en bosques de coníferas y ecosistemas de Pino-Encino por lo que se distribuye de manera natural en doce estados del país.

Se requiere producir grandes cantidades de planta para abastecer los programas de reforestación en las diferentes entidades, en donde los viveros son vitales para garantizar un suministro adecuado de plántulas sanas y vigorosas por tener un ambiente controlado, monitoreo de problemas fitosanitarios y tener semillas con mejoramiento genético en algunos casos, en el estado de Hidalgo se cuenta con trece viveros que ofrecen plantas principalmente de *Pinus greggii*, *P. patula*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*, además de tres unidades productoras de germoplasma dedicadas únicamente a la especie maderable de *Pinus montezumae* (Flores *et al.*, 2019). En estos viveros las plántulas a menudo enfrentan desafíos como enfermedades y condiciones inadecuadas que pueden obstaculizar su crecimiento inicial en campo.

Los desafíos anteriores se pueden prevenir al utilizar micorrizas debido a que estas tienen una relación simbiótica que se establece entre raíces de plántulas y el micelio de hongos, y fertilizantes que les proporcionan a las plantas los nutrimentos esenciales para un desarrollo óptimo.

Existen principalmente dos tipos de micorrizas: ectomicorrizas y endomicorrizas, estas se diferencian debido a que las ectomicorrizas sus hifas no penetran en las células de la raíz, mientras que en las endomicorrizas si las penetran. El desarrollo de esta simbiosis comenzó a desarrollarse hace aproximadamente 400 millones de años (Sosa *et al.*, 2006). Algunos de los beneficios que se obtienen con la asociación micorrízica con las plántulas en condiciones de estrés es que ayuda a transportar agua de mayores distancias y disminuye daños causados por enfermedades.

Las micorrizas mejoran la solubilidad y movilidad de nutrientes hacia las plántulas, lo que les confiere mayor resistencia (Pera & Parladé, 2005; Hernández *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2021).

La micorrización de diversas especies de angiospermas y gimnospermas con hongos ectomicorrízicos ha mostrado resultados exitosos, especialmente en experimentos *in vitro*, aunque en menor medida en condiciones de vivero. Entre los géneros de hongos más empleados se incluyen *Hebeloma*, *Laccaria*, *Rhizophogon*, *Scleroderma*, *Suillus* y *Pisolithus* (Pera & Parladé, 2005).

Los fertilizantes son sustancias orgánicas o inorgánicas que proporcionan a las plantas nutrientes esenciales para mejorar su crecimiento, actualmente los fertilizantes de liberación contrada son los que más se ocupan en viveros forestales debido a que estos liberan los nutrientes de una manera gradual en lugar de hacerlo de forma inmediata, así reducen costos y minimizan la pérdida de fertilizantes por lixiviación como los fertilizantes tradicionales hidrosolubles (Rose *et al.*, 2004; Landis & Dumroeste, 2009).

La fertilización en plantas de vivero es una práctica fundamental para asegurar un crecimiento vigoroso y saludable desde las primeras etapas de su desarrollo, debido a que también mejora la resistencia de las plantas a enfermedades y condiciones adversas, si bien, es importante considerar que un manejo nutricional adecuado depende de la especie, tipo de fertilizante y las dosis que se aplicaran, para asegurar un desarrollo exitoso y no provocar toxicidad (Oliet *et al.*, 2013).

Con base en este marco teórico, en el presente estudio se utilizó el producto comercial MycoRacine MP® que contenía *Pisolithus arhizus* y fertilizante Multicote Agri® en 3 y 6 kg m⁻³ aplicado a *Pinus pseudostrobus* Lindl. con el propósito de impactar de manera positiva en la calidad de plántulas producidas en vivero, asegurando que dicha calidad favorezca la supervivencia y el establecimiento exitoso en campo.

1.1 Objetivos

General

Evaluar el efecto de la inoculación de *Pisolithus arhizus* con fertilización de 3 y 6 kg m⁻³ sobre el crecimiento, desarrollo y calidad de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condición de vivero, con el fin de identificar prácticas culturales que mejoren la salud y el rendimiento de estas plántulas, promoviendo así su establecimiento exitoso en proyectos de reforestación y conservación.

Específicos

- Evaluar el efecto de la inoculación con *Pisolithus arhizus* en crecimiento de altura, diámetro y la calidad de las plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl.
- Analizar la interacción entre la inoculación con *Pisolithus arhizus* y el fertilizante Multicote Agri® en 3 y 6 kg m⁻³, en la calidad de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl.
- Identificar la dosis óptima de fertilización que, combinada con la inoculación de *Pisolithus arhizus*, maximice el crecimiento y desarrollo de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condición de vivero.

1.2 Hipótesis

H₀. Ninguno de los tratamientos con MycoRacine®, Multicote Agri® o su combinación presentan efectos significativos sobre la calidad de las plántulas en comparación con el testigo.

H₁. Al menos uno de los tratamientos con MycoRacine®, Multicote Agri® o su combinación mejora significativamente la calidad de las plántulas en comparación con el testigo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Producción de plántula en viveros comerciales en México

2.1.1 Sustratos que se utilizan en viveros

Abad *et al.* (2004), define sustrato como todo material sólido o mezcla de materiales orgánico o inorgánico que colocado en un contenedor da soporte físico que permite el buen desarrollo del sistema radicular de la plántula.

En los viveros los sustratos pueden desempeñar un papel variable en el proceso de nutrición de las plántulas. Estos se clasifican en dos categorías aquellos que sirven exclusivamente como soporte para las plántulas, tales como perlita, lana de roca y roca volcánica; y aquellos que contribuyen al proceso de adquisición y fijación de nutrientes, como las turbas y la corteza de pino (Pastor, 1999).

En los viveros forestales destinados a la producción de plántulas, se emplean diversas mezclas de sustratos con proporciones variables, ajustadas según las necesidades específicas de la especie, el clima y el objetivo. Por ejemplo, una mezcla compuesta por 60 % peat moss, 20 % de vermiculita, 10 % de agrolita y 10 % de corteza de pino molida es ideal para especies que requieren un sustrato liviano, con buena aireación y alta capacidad de retención de humedad, condiciones favorables para la germinación y el desarrollo inicial de las raíces. En contraste, otra mezcla formada por 40 % tierra agrícola, 30 % peat moss, 15 % agrolita y 15 % corteza molida de pino ofrece un sustrato más económico, con mayor contenido mineral y estructura más firme, adecuado para plántulas que requieren un soporte nutricional más elevado durante su desarrollo en vivero (Rodríguez, 2010).

Durante la preparación de las mezclas de sustratos se deben de considerar las siguientes actividades; evitar el uso de tierra o residuos de los sustratos anteriores, realizar la mezcla y su humectación en el patio de maniobras o en otro espacio que cuente con piso de concreto, si el sustrato no se utiliza de inmediato después de prepararse se recomienda cubrir con plásticos impermeables para prevenir la deshidratación y evitar la contaminación del mismo y lavar todos los materiales utilizados, así como esterilizarlos antes y después de su uso (DOF, 2016).

2.1.2 Producción de pinos en vivero

La reproducción por semilla es la propagación más utilizada en los viveros forestales, debido a que muchas especies nativas presentan alto potencial de germinación y crecimiento a partir de semillas. En algunas especies la obtención de semillas de pino requiere de un proceso prolongado dado que la adquisición de semillas debe realizarse con suficiente anticipación, puesto que algunas especies forestales producen semillas cada dos, tres o hasta cuatro años (Salmiaton & Firoozeh, 2015).

2.1.2.1 Identificación y recolección de conos de pino

Los conos inmaduros de pino se caracterizan por su color verde y por lo regular se encuentran en ramas superiores de los árboles, a medida que maduran cambian a color marrón con escamas cerradas, para determinar la madurez del cono se observan dos características; el color marrón y escamas entreabiertas. La recolección de semillas se recomienda cuando los conos están maduros, debido a que se agiliza la actividad de recolección, para extraerlas se agita o golpea suavemente el cono en caso de que las semillas no se retiren por si solas existen varias técnicas para acelerar el proceso de maduración, una de ellas es colocándolos bajo el sol por periodos de tres horas durante cuatro días (CONABIO, 2019).

2.1.2.2 Almacenamiento de la semilla

Una vez recolectada la semilla se almacena en lugares frescos y secos en envases herméticos o bolsas selladas para maximizar su vida útil, la semilla de pino puede durar hasta 5 años dependiendo de los factores en donde se mantenga almacenada. También las semillas pueden ser almacenadas en refrigeradores con temperatura óptima de 0 °C a 4 °C, para prolongar su viabilidad y evitar la contaminación por hongos (Salmiaton & Firoozeh, 2015).

Para garantizar la conservación de la identidad genética de las semillas almacenadas, es fundamental utilizar etiquetas de control tanto en el interior como en el exterior del envase. Estas etiquetas deben incluir, como mínimo, la siguiente información (Rodríguez, 2010; Salmiaton & Firoozeh, 2015):

- Nombre científico y común de la especie
- Fecha de recolección

- Lugar de procedencia
- Número de lote
- Cantidad de semillas
- Porcentaje de pureza
- Porcentaje de germinación

2.1.2.3 Proceso antes de sembrar

La germinación de las semillas requiere de condiciones adecuadas de humedad, temperatura y luz por lo cual para que la semilla germine rápido se coloca en agua durante 20 a 24 horas cambiándola cada 6 a 8 horas, aparte de que favorece la germinación con este tratamiento se detectan semillas vanas, las cuales se pueden identificar por flotar en el agua. Después de que se remojó la semilla debe de ser desinfectada con una solución de 10 % cloro comercial y 90 % agua durante 10 minutos, posteriormente debe de enjuagarse por tres a cuatro veces, terminando ese proceso se elimina el exceso de agua con papel secante (Prieto *et al.*, 2009).

2.1.2.4 Sembrado de la semilla

Para la siembra debe de ir colocada la semilla a la profundidad de dos veces el tamaño de la misma, en general para el género *Pinus* se estima la profundidad de 0.5 y 1.0 cm, después se cubre con el mismo sustrato. Para asegurar la germinación por lo regular se siembran dos semillas en la misma cavidad, aunque esto depende de la viabilidad de la semilla (Prieto *et al.*, 2009).

2.1.3 Práctica de fertilización

La fertilización es una práctica que proporciona a las plantas los nutrientes esenciales para su desarrollo, la cual es adaptada a las necesidades determinadas de cada especie y varía según las etapas de crecimiento en el vivero. La fertilización tradicionalmente en viveros forestales se lleva a cabo en tres etapas: germinación, crecimiento rápido y lignificación o endurecimiento, esto con la finalidad de cumplir el compromiso de tener plántulas de tallas óptimas para llevarlas a campo (SEDAGRO, 2007; DOF-2016).

2.1.3.1 Tipos de fertilizantes y sus beneficios en pinos

Los fertilizantes son sustancias que se aplican al suelo o a las plantas con el objetivo de aportar nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo, se encuentran en diferentes presentaciones: sólidos, ultra solubles, líquidos y gaseosos, en donde dependiendo de su aplicación ya sea directamente al suelo, al follaje o a través del riego se reflejará la eficiencia, de acuerdo con la FAO e IFA (2000).

Los fertilizantes sólidos contienen los macronutrientes principales tales como el nitrógeno, fosforo y potasio (N, P, K), en algunos casos se combinan con calcio, cobre, hierro, magnesio, azufre, boro, molibdeno y zinc (Ca, Cu, Fe, Mg, S, B, Mo y Zn). Los fertilizantes de liberación controlada tienen una envoltura de polímeros el cual permite una liberación controlada, en donde al pasar el agua hacia en el interior de este permite disolver los nutrimentos hasta en un periodo que varía de 3 a 18 meses (Landis, 1989).

Ventajas de utilizar fertilizantes de liberación controlada (Rose *et al.*, 2004; Landis & Dumroeste, 2009; Ali & Danafar, 2015; Chandra *et al.*, 2019):

- Disminuye las perdidas por lixiviación
- Permite la disponibilidad de los nutrimentos desde el inicio del crecimiento de las raíces
- Genera menor tiempo y energía para la absorción
- Evita quemar a la planta o las hojas por exceso
- Minimizan el daño a semillas o plántulas por exceso de sales
- Reducen la mano de obra

2.1.4 Principales problemas que se encuentra la plántula de pino en el vivero

En la producción de plántulas en vivero los principales problemas que se encuentran en el área son las hierbas que crecen en ellos, esto pasa por las semillas que se dispersan por el viento o por aves provenientes de árboles adultos cercanos o dentro del vivero, afectando a las mismas por la competencia de agua y nutrientes, además, de que se crean condiciones de humedad y alimento en donde se pueden beneficiar insectos o patógenos provocando negativamente el desarrollo y calidad de plántulas forestales (DOF-2016).

En los viveros forestales los organismos que se encuentran comúnmente asociados a las plantas son los insectos y hongos, por eso es importante que los responsables de los viveros lleven a cabo un monitoreo constante para tomar decisiones correctas en caso de detectar enfermedades que estén causando daños. Una enfermedad que ocasiona problemas en viveros forestales es el llamado mal de los almácigos, la cual es una enfermedad que se presenta después de la germinación y reduce el riesgo cuando las plantas ya tienen el tallo lignificado. El daño que ocasiona esta enfermedad es la podredumbre de los tejidos a nivel del cuello que provoca su muerte, los hongos causantes de esta enfermedad son *Fusarium*, *Pythium* y *Rhizoctonia* (Acosta, 2007; Medrano & Ortuño, 2007).

2.1.5 Cuidados de la plántula en vivero

A lo largo del proceso de producción de planta en vivero se debe de mantener el cuidado exclusivo de estas, debido a que las enfermedades tienen mayores probabilidades de establecerse en organismos que no cuentan con las condiciones óptimas de crecimiento (Heras, 2021).

Una de las estrategias a realizar son los recorridos dentro del vivero por lo menos cada tercer día, en los que se riegan las plantas, quitar especies vegetales que se encuentre en los mismos tubetes o bolsas, al igual que identificar si cambian de color las hojas de las plántulas o cualquier otra anomalía, así como revisar y darle mantenimiento por lo menos una vez al mes a la infraestructura como revisar que la malla sombra se encuentre en buenas condiciones, entre otras.

Cuando en el vivero se tiene disponibilidad de nutrientes, agua y temperaturas óptimas para el crecimiento de las plantas, estas presentan mayor resistencia a las enfermedades, no obstante, no siempre todos los casos tienen éxito por lo cual se deben de realizar diagnósticos de la producción de plantas en vivero con el fin de llevar el control y atender lo antes posible los casos de enfermedades en caso de ser requerido. Los diagnósticos deben de considerar los siguientes factores (DOF-2016):

- Características ecológicas del sustrato, condiciones ambientales y factores biológicos
- Antecedentes del manejo de la producción de plantas
- Resultados de la observación de la producción de plantas
- Organismos encontrados tanto bióticos como abióticos

Durante estos diagnósticos lo que se puede observar son enfermedades por daños abióticos que son el resultado de cambios permanentes relacionados con nutrientes minerales, condiciones climáticas (calor, frío, luz y viento), productos químicos (plaguicidas o contaminantes) y enfermedades por daños bióticos las cuales surgen a causa de la presencia de plagas y enfermedades como son hongos, bacterias, virus, hierbas y animales como insectos, roedores, aves y nematodos (DOF-2016).

2.2 Micorrizas

En 1885 el botánico alemán Albert Bernard Frank acuñó el término “micorriza” del griego mykos (hongos) y del latín rhiza (raíz), para describir la asociación simbiótica entre hongos y raíces de plantas. Una relación simbiótica es una interacción cercana y prolongada entre dos organismos de diferentes especies, en la que al menos uno de ellos obtiene algún beneficio.

En el caso de las micorrizas, las hifas del hongo actúan como una extensión del sistema radicular de la planta incrementando significativamente la superficie de exploración en el sustrato, esto mejora la absorción de agua y minerales esenciales por parte de la planta, a cambio, el hongo recibe carbohidratos producto de la fotosíntesis, así como un entorno estable que favorece el desarrollo de las hifas (Andrade, 2010).

2.2.1 Tipos de micorrizas

Las micorrizas se pueden agrupar en dos grandes categorías debido principalmente a su diversidad estructural: endomicorrizas y ectomicorrizas. Las endomicorrizas tienen un micelio que invade las células de la corteza de las raíces, tanto entre las células (intercelularmente) como dentro de ellas (intracelularmente), por otro lado, las ectomicorrizas tienen micelio alrededor de la raíz, formando un manto (Smith & Read, 2010).

A continuación, se describen tipos de micorriza que se han ocupado en viveros forestales:

- **Hongos micorrízicos arbusculares.** Estos hongos se encuentran entre los más estudiados actualmente debido a su resistencia a factores de estrés abiótico (Porcel *et al.*, 2012), la biorremediación a través de la absorción de metales pesados (Pérez *et al.*, 2019) y mejora la estructura y agregación del suelo (Barbosa *et al.*, 2019) por lo cual se han empleado para diferentes propósitos naturales y ecológicos.

Estos hongos son biotrofos, los cuales ocupan de plantas vivas para completar su ciclo de vida, colonizando cerca del 80 % de las plantas terrestres. Estos hongos forman una gran red de micelio que permite a la superficie de absorción de las raíces aumente hasta 10 veces, estos hongos aportan agua y nutrientes minerales no disponibles en el suelo (Smith & Read, 2010).

- **Hongos ectomicorrízicos.** Estos hongos son organismos macroscópicos, ya que los de este grupo son simbioses y saprófitos facultativos. Los hongos ectomicorrízicos poseen una estructura conocida como red de Hartig a través de la cual se intercambian nutrientes, el manto se forma en las puntas de las raíces facilitando que el micelio se extienda y como resultado obtenga mejor absorción de nutrientes en comparación con las raíces (Carrillo *et al.*, 2022).

2.2.2 Relación micorriza-fertilizante y micorriza-planta producida en vivero

En la interacción entre hongos ectomicorrízicos y fertilizantes se ha reportado que altas dosis de fertilización reducen significativamente el nivel de micorrización, lo que provoca una relación inversa a lo que se busca (Baltasar *et al.*, 2007; Salgado *et al.*, 2009). Para obtener resultados favorables se debe saber que según la especie de hongo se tendrá una respuesta a la fertilización, esto debido a que algunas especies ectomicorrízicas son más sensibles, lo que puede afectar a su capacidad de colonizar las raíces, al igual que es necesario considerar un uso moderado de fertilizante, el cual dependerá de la especie de planta y hongo que se esté utilizando (Brundrett *et al.*, 1996; Trappe, 1997).

La asociación hongo-planta tiene como beneficio el intercambio de nutrientes. Ya que, la planta proporciona al hongo de 5 a 20 % de carbono adquirido por la fotosíntesis y por otro lado el hongo le proporciona a la planta nitrógeno y fósforo (Smith & Read, 2010; Carrillo *et al.*, 2022). Entre los múltiples beneficios que se obtienen con esta simbiosis son que mejora la asimilación de nutrientes, favorece la absorción de nutrientes y agua, tolerar el estrés hídrico y les otorga resistencia a enfermedades (Iturriaga, 2019).

2.2.3 Efectos de la ectomicorriza en la nutrición de las plántulas

Los efectos de las ectomicorrizas en la nutrición de las plántulas son bastante significativos y se pueden desglosar en varios aspectos (Hernández *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2022):

- **Aumento de la absorción de nutrientes:** Las ectomicorrizas extienden la red de raíces a través de hifas, que tienen la capacidad de explorar un volumen de suelo mucho mayor que las raíces por sí solas. Esto permite a las plántulas acceder a nutrientes que de otro modo estarían fuera de su alcance y obtener mejores resultados en suelos pobres.
- **Aumento del contenido mineral:** Las plántulas micorrizadas suelen mostrar mayor contenido mineral en sus tejidos, lo que se traduce en mejor salud general y resistencia al estrés ambiental.
- **Efectos sobre el crecimiento radicular:** La asociación con hongos micorrízicos va a modificar la morfología de las raíces resultando crecimientos de las puntas de las raíces micorrizadas, lo que mejora aún más la capacidad de absorción de agua y nutrientes.

2.2.4 Inoculación de micorriza en plantas de vivero

El proceso de inoculación en vivero puede ser la tarea desde muy compleja hasta muy simple dependiendo del cómo se desea incorporar. A continuación, se presentan algunas formas de inoculación.

Inoculación por esporas

El uso de este tipo de inoculante es muy utilizado en los viveros forestales, esencialmente con hongos que producen gran cantidad de esporas, estos esporocarpos pueden emplearse para proveer inóculos esporales ya sean frescos o secos, lo que permite su uso en la inoculación en vivero a gran escala. La incorporación de esporas puede hacerse mediante soluciones acuosas directamente en el sistema de riego del vivero, o mezclando el producto con las semillas un momento antes de la siembra, lo recomendable es utilizar esporas frescas y con dosis altas de concentración (Quiroz *et al.*, 2009), no obstante, las esporas secas o húmedas se pueden almacenar en refrigeración a 4 °C (Carrillo *et al.*, 2022).

Inoculación con inoculo líquido

Las micorrizas solubles es la combinación versátil de hongos micorrízicos y otros microorganismos del suelo que proporcionan un efecto rápido en casi todos los tipos de plantas y suelos. La inoculación se puede llevar a cabo mediante riego o inyección al suelo, para ambos es importante seguir las instrucciones del producto para determinar las dosis correctas por cada litro de agua (Revolution, 2019).

- **Inoculación por riego:** Una vez que se realiza la combinación el riego es de manera habitual, pero es fundamental no utilizar la preparación si ha pasado más de ocho horas.
- **Inoculación por inyección.** Esta inyección se genera a una profundidad de 15 a 20 centímetros, lo que permite que la micorriza llegue a las raíces de manera eficaz.

2.2.5 Importancia de las ectomicorrizas en el desarrollo de *Pinus*

La asociación micorrízica es una estrategia nutricional que han establecido muchas plantas en colaboración con algunos hongos, esta simbiosis resulta en beneficios mutuos, razón por la cual se ha mantenido evolutivamente en una gran diversidad de especies vegetales. Dentro del amplio espectro de asociaciones micorrízicas, las ectomicorrizas tienen especial relevancia en los ecosistemas forestales, en particular desempeñan un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de especies del género *Pinus* (Smith & Read, 2010).

Los beneficios que surgen de esta asociación son múltiples, entre los más importantes es la mejora en la resistencia a patógenos del suelo, ya que la colonización micorrízica actúa como barrera física que impide el acceso de microorganismos patógenos a los tejidos radicales, además, estas asociaciones permiten mayor tolerancia al estrés hídrico, gracias a la expansión del sistema de absorción de agua mediante el micelio del hongo, que puede explorar volúmenes de suelo más allá del alcance de las raíces, otro beneficio significativo es la mayor eficiencia en la absorción de nutrientes del suelo (Smith & Read, 2010).

Como resultado de todos estos efectos positivos, la asociación micorrízica contribuye de forma notable a incrementar la supervivencia y el establecimiento exitoso de las plantas en campo, especialmente en ambientes con condiciones adversas (Duñabeitia *et al.*, 2004).

2.2.5.1 Porcentaje de emergencia al utilizar ectomicorrizas

La aplicación de ectomicorrizas durante las etapas tempranas del desarrollo vegetal ha demostrado ser buena estrategia para mejorar la emergencia de plántulas forestales. Iturriaga (2019), demostró con su trabajo de inoculación con *Suillus luteus* en dos especies forestales *Pinus radiata* y *P. patula*, que al aplicar la micorriza en el momento de la siembra en doce días de la emergencia se generó la tasa más alta de establecimiento alcanzando hasta un 90%. De este modo la adecuada aplicación micorrízica influye significativamente en la tasa de emergencia y el vigor inicial de las plántulas.

2.2.6 Disminución de enfermedades en árboles de pino con el uso de micorrizas

Las micorrizas aportan resistencia en las plantas en enfermedades, así como en la mitigación de daños causados por la toxicidad de ciertos suelos (estrés ambiental/abiótico). Al proporcionar mejor nutrición, las plantas desarrollan mayor resistencia frente a organismos patógenos, lo que mejora su salud sin necesidad de utilizar agrotóxicos. Por lo tanto, el uso de micorrizas no solo representa ahorro en recursos químicos (como pesticidas y fertilizantes), sino que también contribuye a disminuir efectos en el ambiente (Iturriaga, 2019).

Las micorrizas reducen el riesgo de enfermedades, ya que ciertos tipos de micorrizas protegen a las plantas huéspedes de ataques de patógenos como *Phytophthora* y *Fusarium* que son responsables de la podredumbre de las raíces.

Las micorrizas contribuyen a la reducción de enfermedades en *Pinus* mediante varias acciones (Newsham *et al.*, 1995; Franco, 2012):

- Producción de antibióticos por parte del hongo, que retiran a los patógenos de las raíces.
- Creación de barrera física a través del manto de hifas: el espacio que ocupa el hongo en las raíces protege al huésped de patógenos, lo que genera resistencia mediante exclusión competitiva del patógeno. Esto proporciona notable resistencia frente a posibles patógenos radiculares.
- Producción de inhibidores químicos por parte del huésped, inducidos como respuesta a la invasión del hongo.
- Establecimiento de comunidades microbianas que desempeñan un papel protector en la rizosfera.

2.2.7 Efecto de la micorriza en la fisiología de la plántula

Las micorrizas tienen impacto positivo en las plantas ya que mejoran la absorción de nutrientes y agua, esto ocurre porque favorecen una evapotranspiración adecuada y optimizan el funcionamiento fisiológico de las plantas en general. Las micorrizas promueven mayor derivación y desarrollo de las raíces, además de alargar las células, lo que resulta en mayor eficacia. La superficie total que forman millones de hifas es considerablemente mayor que la de planta sin micorrizas (Franco, 2012).

Las micorrizas son la simbiosis entre hongos y las raíces de las plantas que tiene efectos positivos en la fisiología de las plántulas, como:

Mejoran la absorción de agua y nutrientes. Las micorrizas toman azúcares de las raíces de las plantas y, a su vez, aportan minerales como fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, azufre, zinc, cobre y estroncio al sistema vascular de la planta. Además, las micorrizas optimizan la disponibilidad de agua y ayudan a la absorción de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno (Franco, 2012).

Aumentan el desarrollo de las raíces. Las micorrizas originan efectos hormonales que estimulan la segregación de auxinas, es la hormona que promueve el crecimiento de las raíces lo que permite explorar mayor volumen de suelo en busca de agua y nutrientes (Franco, 2012).

Incrementan la capacidad fotosintética. Las micorrizas influyen positivamente en los procesos metabólicos dentro de la planta, lo que puede llevar a la mayor producción de azúcares durante la fotosíntesis, además, permite que fije más CO₂ y aumente el intercambio de agua y nutrientes (Franco, 2012).

2.2.8 Uso de hongos ectomicorrízicos para favorecer la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en condiciones adversas

Durante los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios relacionados con los beneficios de utilizar hongos en especial *Pisolithus arhizus* para la producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en vivero, Gómez *et al.* (2015) obtuvo como resultado que la inoculación con el hongo ectomicorrizógeno tiene efecto positivo en el crecimiento, pero sobre todo en la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de estrés hídrico.

El efecto es evidente tanto en plantas en condiciones normales de riego en presencia del hongo, como en plantas que se encuentran en sequía extrema, donde se exhibe la mortalidad del total de las plantas sin hongos.

Otros estudios reportan que existe la relación inversa entre la dosis de fertilización y el nivel de micorrización, es decir, una mayor dosis de fertilizante tiende a reducir la colonización micorrízica (Baltasar *et al.*, 2007; Salgado *et al.*, 2009), al igual, Khasa *et al.* (2001), reportan que en ciertos casos la micorrización no muestra una respuesta significativa frente a los niveles de fertilización, a pesar de ello se ha evidenciado que la respuesta puede variar dependiendo de la especie de hongo ectomicorrízico utilizado, lo que sugiere que algunas especies pueden ser más susceptibles a la fertilización que otras (Trappe, 1977 & Brundrett *et al.*, 1996).

2.3 Evaluación de calidad de plántula producida en vivero

La evaluación de la calidad de plántulas es importante para determinar su potencial en las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo. Para realizar esta evaluación se utilizan diferentes criterios que se pueden clasificar en dos categorías principales; criterios morfológicos los cuales son características visibles y medibles de la planta que permiten evaluar su estado físico y su potencial para sobrevivir y los criterios fisiológicos que evalúan el estado interno y funcional de la planta, muchas veces no visible a simple vista, pero es determinante para su rendimiento en campo. A continuación, se presentan algunos de los criterios más comunes para evaluar la calidad de plántulas (Salmiaton & Firoozeh, 2015).

A) Criterios morfológicos

- **Altura de la planta:** es la longitud desde la base del tallo (cuello de la raíz) hasta el punto más alto de la planta. Se utiliza regla con precisión al milímetro.
- **Diámetro:** es el grosor del tallo. Se evalúa con vernier con precisión al milímetro.
- **Índice de calidad de Dickson:** índice que combina varias medidas (altura, diámetro, peso seco del tallo, raíces y partes aéreas) para evaluar la calidad global de la planta, este indica el equilibrio entre parte aérea y sistema radicular. Se calcula con fórmula que se describe en el apartado de materiales y métodos.
- **Arquitectura de la parte aérea:** describe la forma y distribución de hojas y ramas en la parte superior de la planta, incluye ramificación equilibrada y distribución uniforme de hojas. Se obtiene a partir de evaluación visual y toma de fotografías.

- **Arquitectura de la raíz:** es la forma longitudinal, volumen y distribución de las raíces, también se revisa que tenga buena proporción respecto al tamaño de la parte aérea. Se evalúa con regla y un software de análisis de raíces.

B) Criterios fisiológicos

- **Relación agua-planta:** mide la capacidad de la planta para retener y utilizar el agua de forma eficiente. Se puede evaluar mediante el contenido de agua en los tejidos o el potencial hídrico.
- **Nutrición:** evalúa el nivel de nutrientes esenciales como nitrógeno, fosforo, potasio, hierro entre otros, en los tejidos de la planta. Este criterio se mide a través de análisis foliares o de tejido seco.
- **Potencial de regeneración radicular:** es la capacidad de la planta para formar nuevas raíces después del trasplante. Se mide observando el número y longitud de raíces nuevas que se forman después de 15 días en condiciones controladas.

2.4 Características de las especies estudiadas

2.4.1 *Pinus pseudostrobus* Lindl.

2.4.1.1 Características generales

Pinus pseudostrobus Lindl., es un árbol perennifolio con copa amplia, densa y piramidal; ramas abundantes, verticiladas en sus primeros dos tercios de la copa, hojas aciculares y canales resiníferos, con fuste recto (Vázquez, 2023), se conocen coloquialmente como; pino liso, pino de ocote, pino blanco, pino lacio, ocote blanco, asimismo se conoce por los nombres indígenas chamite, pacingo y pinabete. La amplia distribución de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con variaciones climáticas, le ha permitido reivindicar ser una especie de gran importancia ecológica y económica (Sandoval *et al.*, 2020).

La zona ecológica de esta especie se ubica en bosques de montaña alta con clima seco y húmedo, con temperaturas promedio anual entre 18 a 21°C. Requiere suelos profundos, preferiblemente de origen volcánico, ligeramente ácidos (pH entre 5.5 y 6.5) sueltos y bien drenados con precipitación promedio anual de 800 a 2,000 mm en un rango altitudinal de 2400 a 2800 msnm. (CONABIO, 2019 & Vázquez, 2023).

2.4.1.2 Clasificación taxonómica

- Reino: Plantae
- Filo: Tracheophyta
- Clase: Equisetopsida
- Orden: Pinales
- Familia: Pinaceae
- Género: *Pinus*
- Especies: *pseudostrobus*

2.4.1.3 Forma biológica

Es un árbol que logra los 30 a 40 metros de altura promedio llegando alcanzar rara vez los 45 metros, con diámetros que van alrededor de 40 a 80 centímetros por lo regular tiene fuste recto (Figura 1), libre de ramas de 30-50 % aproximadamente de su altura total y tiene hojas perennifolias (CONABIO, 2019).



Figura 1. *Pinus pseudostrobus* Lindl. tomado de Cruz (2016).

2.4.1.4 Origen y distribución en México

Este árbol es originario de México, Guatemala y Honduras. En México se encuentra en bosques de coníferas, bosque de pino-encino y con amplia distribución en los estados de Jalisco, Michoacán, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. En menor distribución se encuentran ejemplares en los estados del norte de México como Tamaulipas, Nuevo León, Durango y Sonora (CONABIO, 2019).

2.4.1.5 Importancia

El *Pinus pseudostrobus* Lindl. es de gran importancia económica, ya que produce resina en abundancia y su madera de alta calidad es empleada en múltiples usos, como en el aserrío, la fabricación de triplay y chapas, así como en la elaboración de cajas de empaque, molduras, construcción, ventanas, muebles finos, artesanías, pulpa para papel y ebanistería. Esta especie es ideal para plantaciones comerciales. También ha sido utilizada a lo largo del tiempo por sus propiedades medicinales y como planta ornamental en espacios abiertos, parques y campos deportivos, gracias a su agradable aroma que emana su resina (CONABIO, 2019; Vázquez, 2023).

2.4.2 *Pisolithus arhizus*

2.4.2.1 Características generales

Pisolithus arhizus anteriormente conocido como *Pisolithus tinctorius*, ha sido objeto de diversas revisiones taxonómicas a lo largo del tiempo. En la literatura antigua es común encontrar referencias a *Pisolithus tinctorius* las cuales siguen siendo válidas y comprensibles dentro del contexto taxonómico presente. El nombre actual *Pisolithus arhizus* (Scop.) Rauschert fue aceptado en 1959 por Rauschert en su publicación de la revista *Zeitschrift fur Pilzkunde* (Rauschert, 1959).

Pisolithus arhizus es un hongo ectomicorrizógeno que ha sido inoculado con éxito en plántulas forestales en países de los cinco continentes (Márquez *et al.*, 2013). Es de los hongos colorantes más fuertes conocidos, este tiene un tinte que mancha las manos, la ropa y casi todo lo que toca, es de los pocos hongos que mancha a los encinos. También se distingue porque es un hongo que proporciona extensa escala de colores cálidos de amarillo oscuro a dorado otoño de color marrón oscuro de cacao, esta variación del colorante depende de la edad del hongo (Gutiérrez, 2014).

Este hongo crece en relación simbiótica con pinos y encinos, se encuentra a menudo en senderos y caminos forestales. Son fáciles de detectar desde lejos por su extraña forma y porque al acercarse se nota en el suelo un círculo del depósito de esporas de color marrón (Gutiérrez, 2014).

2.4.2.2 Clasificación taxonómica

- Subdivisión: Basidiomycotina
- Clase: Homobasidiomycetes
- Subclase: Agaricomycetes
- Orden: Boletales
- Familia: Sclerodermatacea
- Género: *Pisolithus*
- Especie: *arhizus* (Gutiérrez, 2014).

2.4.2.3 Ecología

A partir de primavera *Pisolithus arhizus* comienza a fructificar y puede encontrarse con frecuencia en ambientes abiertos, especialmente en suelos arenosos, taludes, caminos y pistas forestales. Es una especie adaptada a condiciones edáficas pobres o degradadas, aunque puede presentarse en distintos tipos de hábitats, muestra clara preferencia por encinares y suelos arenosos. El período de fructificación se extiende desde la primavera hasta otoño (Gutiérrez, 2014).

2.4.2.4 Estructura y función

El cuerpo fructífero de *Pisolithus arhizus* mide entre 5 y 20 cm de altura y hasta 10 cm de diámetro, fibroso de color pardo amarillento, esporas de color marrón canela, globosas de 7 a 12 μm y espinas de hasta 2 μm de largo (Figura 2). Como característica sobresaliente es que puede sobrevivir en suelos empobrecidos o terrenos perturbados, así como en suelos de alta acidez, o con altas concentraciones de metales pesados y resistir periodos de estrés por sequía (Gómez *et al.*, 2015).



Figura 2. *Pisolithus arhizus*, tomado de Gutiérrez (2014).

2.4.2.5 Importancia

A pesar de tener un aspecto no tan agradable se considera comestible y tiene múltiples utilidades, se utiliza para: medicamentos como inmunodepresor, teñir y reforestaciones para recuperar sitios degradados. Los beneficios que se tienen al utilizar *Pisolithus arhizus* en la producción de planta para reforestaciones son:

- Facilita la captación y acumulación de elementos esenciales como Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Zinc y Azufre entre otros.
- Permite tolerar un rango más amplio de condiciones de pH en el suelo.
- Juega un papel crucial en la regulación del agua, proporcionando a la planta mayor tolerancia a la sequía y a los cambios extremos de temperatura.
- Aumentan la resistencia a enfermedades.
- Permiten mayor longevidad a las raíces
- Producen hormonas reguladoras del crecimiento que estimulan el desarrollo de las plantas de manera favorable (Gutiérrez, 2014, Iturriaga, 2019).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación del área de estudio

El experimento se realizó en el vivero forestal del Instituto de Ciencias Agropecuarias que se ubica en las coordenadas geográficas de 20° 03' 37.05" Norte, 98° 22' 54.45" Oeste, con altitud de 2159 metros sobre el nivel del mar (Google Earth Pro, 2024). La precipitación anual promedio es de 550 mm y la temperatura media anual es de 16 °C (CONAGUA, 2025).

3.2 Semilla e inoculante

3.2.1 Procedencia de semilla

Se utilizaron semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. provenientes de la comunidad de San Rafael Valenzuela, municipio de Huayacocotla, Veracruz. Situada a los 20° 27' 39.73" Norte, 98° 31' 21.60" Oeste, con altitud de 2336 metros sobre el nivel del mar (Google Earth Pro, 2024).

En el cuadro 1 se establecen datos de temperatura media anual de 17 °C, máxima promedio de 21 °C y mínima promedio de 10 °C con precipitación de 947 mm que se concentra principalmente en los meses de mayo a octubre en San Rafael Valenzuela.

Cuadro 1. Climatología a nivel mensual, determinadas en Huayacocotla, Veracruz.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura media (°C)	15	17	18	19	19	18	18	18	17	17	15	16	17
Temperatura máxima (°C)	18	20	22	24	24	23	22	22	21	20	19	18	21
Temperatura mínima (°C)	6	7	9	11	12	13	13	13	13	11	8	6	10
Precipitación (mm)	230	250	370	580	720	1660	1710	1710	2060	1390	470	220	947

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 31 de enero de 2025.

Los conos donde se encuentran las semillas se recolectaron de árboles padres que al momento de realizar la corta de liberación fueron derribados para su aprovechamiento maderable y presentaron conos maduros. La colecta fue a finales del año 2015 y fueron almacenadas en refrigeración $\pm 4^{\circ}\text{C}$ en bolsa de plástico y al ser utilizadas se determinó la pureza del 97.5% en el lote de semilla (Figura 3).

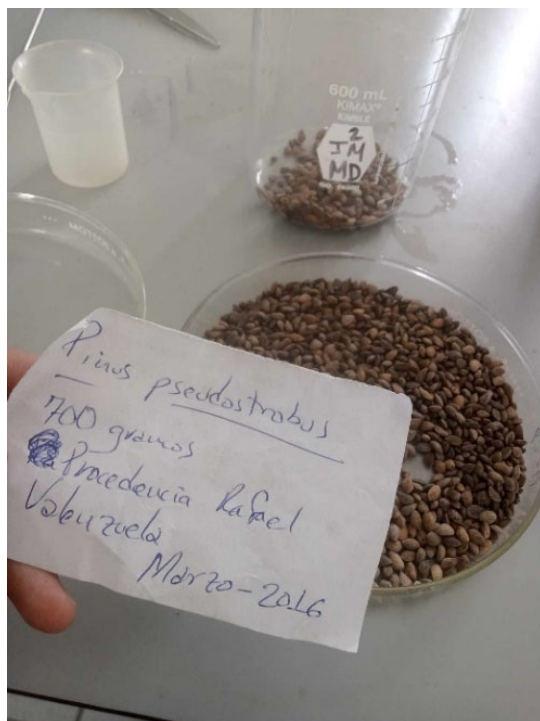


Figura 3. Semilla de *Pinus pseudostrobus* Lindl. almacenada a $\pm 4^{\circ}\text{C}$ por 8 años con 97.5 % de pureza de procedencia de San Rafael Valenzuela, Huayacocotla, Veracruz.

3.2.2 Producto ectomicorrízico comercial

El producto que se utilizó para esta investigación fue MycoRacine MP® debido a la disponibilidad y las recomendaciones del producto, este producto es un inoculante biológico que contiene el hongo ectomicorrízico *Pisolithus arhizus* nativo de México, diseñado para la producción de pino en reforestaciones, promueve la asociación simbiótica entre los hongos y una amplia variedad de especies leñosas.

El fabricante menciona que la concentración de este producto es de 52.5 millones de esporas de *Pisolithus Arhizus*. El cual por cada sobre de 1 kg sirve para inocular de 3,000 hasta 9,000 plantas (Figura 4).



Figura 4. Producto inoculante de MycoRacine. MP ®, el cual contiene el hongo ectomicorrizógeno Pisolithus arhizus, utilizado en el ensayo experimental.

3.2.3 Fertilizante Multicote Agri®

En esta investigación se utilizó el producto comercial Multicote Agri® de la marca Haifa, el cual es un fertilizante sólido granulado con liberación controlada de ocho meses, contiene nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio con 18, 6, 12, 2, 3.5 y 2.1% respectivamente. La presentación es de 25 kg de fertilizante por bulto (Figura 5).



Figura 5. Producto fertilizante Multicote Agri ®, el cual contiene nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio, utilizado en el ensayo experimental.

3.3 Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño completamente al azar, el arreglo factorial fue de 2 x 3 (dos factores: Sin (0) y Con (1) hongo ectomicorrízico) y (tres niveles de dosis de fertilizante de liberación controlada) para tener el total de seis combinaciones y 108 plantas (repeticiones) por tratamiento obteniendo el total de 648 plantas en todo el experimento.

Los factores y niveles son descritos en el cuadro 2.

MycoRacine® (I): (0,1)

Multicote Agri ® (F): (0,3,6) Kg m⁻³

Cuadro 2. Combinaciones del tratamiento utilizados en el experimento.

Tratamiento (kg m ⁻³) *
0-0
0-3
0-6
1-0
1-3
1-6

*Para el factor inoculante se representa con 0 a las plantas sin inoculante y con 1 la aplicación del producto (MycoRacine®); la dosis de fertilizante de liberación controlada se representa con 0 sin fertilizante, 3 dosis de 3 Kg m⁻³, 6 dosis de 6 Kg m⁻³ (Multicote Agri ®).

3.4 Ejecución del experimento

3.4.1 Composición del medio de crecimiento

Se utilizaron distintas proporciones de sustratos para elaborar la mezcla base (medio de crecimiento) como aserrín siendo el principal componente con el 50 %, seguido de la turba de musgo en menor proporción con 20 %, y por último se utilizó vermiculita y tezontle, cada una con el mismo porcentaje del 15 %.

3.4.2 Lavado y desinfectado de charolas

Se utilizaron 648 tubetes con capacidad de 310 cm³ cada uno, los cuales fueron remojados en agua con detergente en polvo para posteriormente tallar las paredes con ayuda de cepillos. Después de asegurarse de eliminar la mayor cantidad de residuos, fueron depositados durante 1 día dentro de la tina de 200 L con agua y 3 L de cloro para su desinfección (Prieto *et al.*, 2009).

3.4.3 Preparación del sustrato

Se preparó la mezcla de sustrato total compuesta por 50 % de aserrín pasado por criba de 1 cm, 15 % de tezontle que se pasó por la misma criba, 15% de vermiculita de tamaño intermedio y 20 % de turba de musgo. El volumen total de la mezcla de sustratos fue de 210 L. Los sustratos se mezclaron hasta obtener la mezcla homogénea (Reyes *et al.*, 2005).

3.4.4 Método de inoculación

Con la mezcla de sustrato listo se separaron 6 porciones iguales de 35 L cada una que corresponde a cada tratamiento. La cantidad de inóculo a aplicar fue de 103.68 g por cada tratamiento en el que estaba presente, el cual se disolvió en 8 litros de agua para posteriormente esparcirse sobre una de las proporciones y se mezcló el sustrato hasta quedar homogénea, el mismo procedimiento se realizó en las demás proporciones a excepción de las que no se necesitaba inocular, en estas proporciones solo se le agregó agua y se procedió a mezclar hasta que se obtuviera la consistencia deseada sin exceso de humedad.

3.4.5 Aplicación de fertilizante

La aplicación del fertilizante Multicote Agri® para el tratamiento de 3 kg m⁻³ se utilizaron 104.77 g y para el tratamiento con la concentración de 6 Kg m⁻³ fueron agregados 209.52 g, todos estos pesos fueron medidos con la ayuda de la balanza de precisión marca A&D® serie FZ-5001. El fertilizante fue agregado en la porción de mezcla de sustrato que corresponde al tratamiento y se mezcló nuevamente el sustrato con la ayuda de palas hasta lograr la distribución homogénea del fertilizante en la mezcla de sustrato.

3.4.6 Llenado de tubetes

Se vació la mezcla de sustratos en cada uno de los tubetes con capacidad de 310 cm³ (Figura 6) el cual se golpeó suavemente para asegurar la compactación homogénea. Los envases negros utilizados son de polietileno negro rígido con guías internas para dirigir las raíces hacia abajo.



Figura 6. Aspecto general del llenado de tubetes (50 % de aserrín, 20 % turba de musgo, 15 % tezontle, 15% vermiculita), utilizados en el ensayo experimental.

3.4.7 Sembrado

Previo a la siembra se seleccionaron 1296 semillas viables de *Pinus pseudostrobus* Lindl., las cuales se sometieron al proceso de remojo en agua a temperatura ambiente durante 24 horas para activar su germinación (Figura 7). Posteriormente, se enjuagaron y depositaron dos semillas por tubete a la profundidad de 0.7 a 1 cm que después fueron tapadas con la misma mezcla del sustrato, esta siembra se realizó el 14 de febrero de 2024.



Figura 7. Semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. sometidas al proceso de remojo en agua a temperatura ambiente por 24 horas.

3.4.8 Manejo de plántulas en el vivero

Después de sembrar, se realizaron riegos ligeros diarios hasta la emergencia de las semillas, posteriormente, el riego se aplicó cada tercer día durante todo el periodo de evaluación de las plántulas.

De igual manera se realizó el mantenimiento manual periódico para eliminar especies vegetales no deseadas que surgían durante el experimento, especialmente durante los meses de precipitación intensa. Este procedimiento permitió minimizar la competencia de agua y nutrientes y asegurar el crecimiento óptimo de las plántulas (Figura 8).



Figura 8. Manejo de especies vegetales no deseadas, a partir del método manual periódico con el objetivo de minimizar la competencia de agua a las plántulas.

3.5 Variables evaluadas

Las variables respuesta evaluadas fueron medidas en diferentes meses:

- Porcentaje de emergencia al primer mes (marzo de 2024)
- Porcentaje de colonización micorrízica al quinto (julio 2024), séptimo (septiembre de 2024) y noveno mes (noviembre de 2024)
- Altura y diámetro al primer (marzo 2024), séptimo (septiembre de 2024) y noveno mes (noviembre 2024)
- Peso seco de la parte aérea y radicular al noveno mes (noviembre de 2024)
- Longitud de raíz e índice de calidad de Dickson al séptimo (septiembre de 2024) y noveno mes (noviembre de 2024)

Para garantizar la objetividad y representatividad de los resultados se tomaron muestras aleatorias en cada uno de estos momentos.

3.5.1 Porcentaje de emergencia

Para obtener el porcentaje de emergencia (PE) se aplicó la fórmula la cual consistió en dividir el número de semillas emergidas entre el total de cavidades y el resultado por cien, un ejemplo de la fórmula se ve a continuación:

$$PE = \left[\frac{(\text{Número de semillas emergidas})}{(\text{Total de cavidades})} \right] \times 100$$

3.5.2 Porcentaje de colonización micorrízica

Para llevar a cabo la evaluación de la presencia de micorriza:

- Se seleccionaron aleatoriamente 5 plántulas por cada tratamiento en el séptimo y noveno mes después de su siembra. Para observar la colonización se realizó un corte de la parte radicular y se sometió a un lavado.
- Posteriormente, cada parte radicular se colocó en cajas Petri preparadas con agua y se etiquetaron.
- Finalmente, se realizó la observación de la raíz por planta de cada tratamiento utilizando un microscopio óptico QM25® con aumento de 10x. La colonización de *Pisolithus arhizus* fue registrada mediante fotografías capturadas con cámara digital AmScope® modelo MD500, conectada al microscopio (Figura 9 y 10).

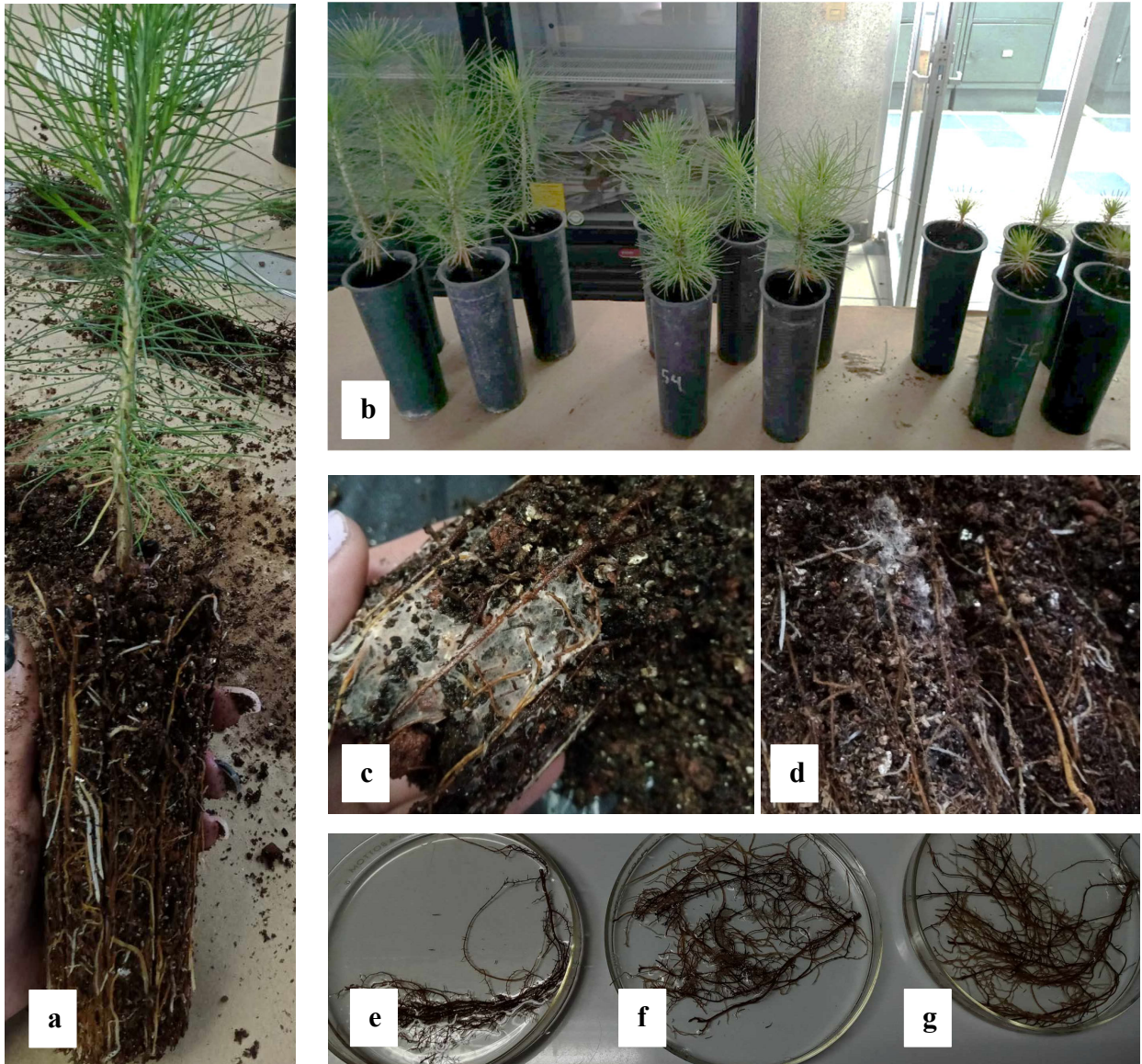


Figura 9. Aspectos generales de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl.: a) parte aérea y radicular del tratamiento $1-6 \text{ kg m}^{-3}$; b) cinco plántulas por tratamientos antes de ser sometidos al lavado de raíz en el noveno mes; c) tratamiento $1-3 \text{ kg m}^{-3}$ en el séptimo mes; d) tratamiento $1-6 \text{ kg m}^{-3}$ al noveno mes; cajas de Petri con los diferentes tratamientos al séptimo mes e) $1-0 \text{ kg m}^{-3}$; f) $1-3 \text{ kg m}^{-3}$; g) $1-6 \text{ kg m}^{-3}$



Figura 10. h) cajas de Petri con los tratamientos 1-0 kg m⁻³, 1-3 kg m⁻³, 1-6 kg m⁻³ al noveno mes del tratamiento; i) microscopio óptico QM25® equipado con cámara digital AmScoop, modelo MD500 para visualizar la ectomicorriza *Pisolithus arhizus*; j) tratamiento de 0-6 kg m⁻³ en donde se verifica que no presentan bifurcaciones por micorrizas; tratamientos correspondientes al noveno mes en donde se observa la presencia de colonización por parte de la micorriza k) 1-0 kg m⁻³; l) 1-3 kg m⁻³ y m) 1-6 kg m⁻³.

El grado de colonización micorrízica fue evaluada a los 5, 7 y 8 meses después de la inoculación. Se observaron 10 campos, contándose el número de raíces con presencia de ectomicorriza y se dividió entre el total de raíces observadas y se multiplicó por 100 para obtener el porcentaje de colonización micorrízica, como se muestra a continuación:

$$PCM = \left[\frac{(\text{No de raíces con presencia de ectomicorriza de cada campo})}{(\text{No de raíces con presencia de ectomicorriza de todos los campos})} \right] \times 100$$

3.5.3 Altura de plantas

Para llevar a cabo las tres mediciones (primer, séptimo y noveno mes) realizadas durante el estudio, se utilizó la regla graduada con precisión al milímetro como herramienta de trabajo, la altura consistió en medir a partir de cuello de la raíz hasta la yema apical de la planta (Figura 11).



Figura 11. Regla graduada al milímetro para medir las plantas de los seis tratamientos en marzo, septiembre y noviembre correspondiendo al primer, séptimo y noveno mes del experimento.

3.5.4 Diámetro de planta

En el primer, séptimo y noveno mes se realizaron las mediciones del diámetro en la base de las plántulas evaluadas con un vernier digital marca Mitutoyo® (Figura 12) y precisión al milímetro. Que consistió en medir el grosor del tallo en el cuello de la plántula.



Figura 12. Vernier digital marca Mitutoyo® para medir diámetro del tallo de la plántula.

3.5.5 Peso seco de parte aérea y parte radicular

Se seleccionaron 5 plantas por tratamiento para evaluar las raíces, éstas fueron lavadas y secadas con papel absorbente, posteriormente la planta se separó en parte aérea y parte radicular, las cuales fueron pesadas en la balanza de precisión marca A&D® serie FZ-5001 (Figura 13), consecutivamente se introdujeron en bolsas de papel con orificios previamente identificadas para después colocarlas en el horno de secado marca Grieve® modelo LW-201C a 70 °C por 72 horas hasta tener el peso constante (Figura 14).

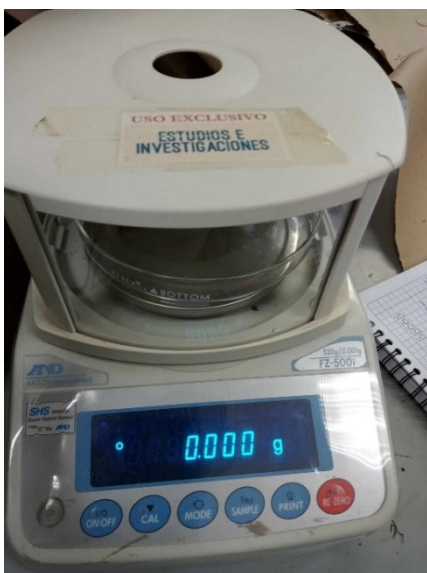


Figura 13. Balanza de precisión serie FZ- 5001



Figura 14. Horno de secado LW -201C.

3.5.6 Longitud de raíz

Después de lavar el sistema radicular se midió la longitud de la raíz principal, que consistió en medir desde el cuello de la planta hasta la punta de la raíz con regla graduada al milímetro.

3.5.7 Índice de Calidad de Dickson (ICD)

Con datos recabados en las secciones anteriores se utilizó la fórmula siguiente que corresponde al ICD.

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

En donde:

- **Peso total seco (g):** es la suma del peso seco de la parte aérea (tallos y hojas) más el peso de la raíz
- **Altura (cm):** es el resultado de medir desde la base del tallo hasta la yema apical
- **Diámetro (mm):** se utiliza un vernier para obtener este resultado, este dato se toma al nivel de cuello de la raíz
- **Peso seco parte aérea (g):** es la biomasa correspondiente al tallo, hojas y ramas
- **Peso seco raíz (g):** total de la biomasa subterránea (raíces)

3.6 Análisis estadístico

Para altura y diámetro se les aplicó el análisis de varianza y prueba de comparación de medias Tukey ($p \leq 0.005$) para determinar el mejor tratamiento, auxiliándose del programa Minitab 18.0 (Minitab, LLC., 2017). Previo al análisis los datos fueron transformados con log natural para cumplir con los criterios de normalidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Porcentaje de emergencia (%)

Periódicamente se revisaron las charolas en donde se sembraron las semillas y al primer mes después de establecido el experimento, se realizó el conteo de las plántulas para poder determinar el porcentaje de emergencia total.

En la evaluación del porcentaje de emergencia de todos los tratamientos, se ha observado que las semillas inoculadas con *Pisolithus arhizus* presentan mayor porcentaje de emergencia al mes de sembradas. Las semillas con aplicación de micorriza y cero fertilizantes (1-0 kg m⁻³) alcanzaron el 45 %. En contraste, el tratamiento 0-6 kg m⁻³ muestra un porcentaje significativamente menor, de 16 % como se observa en la figura 15.

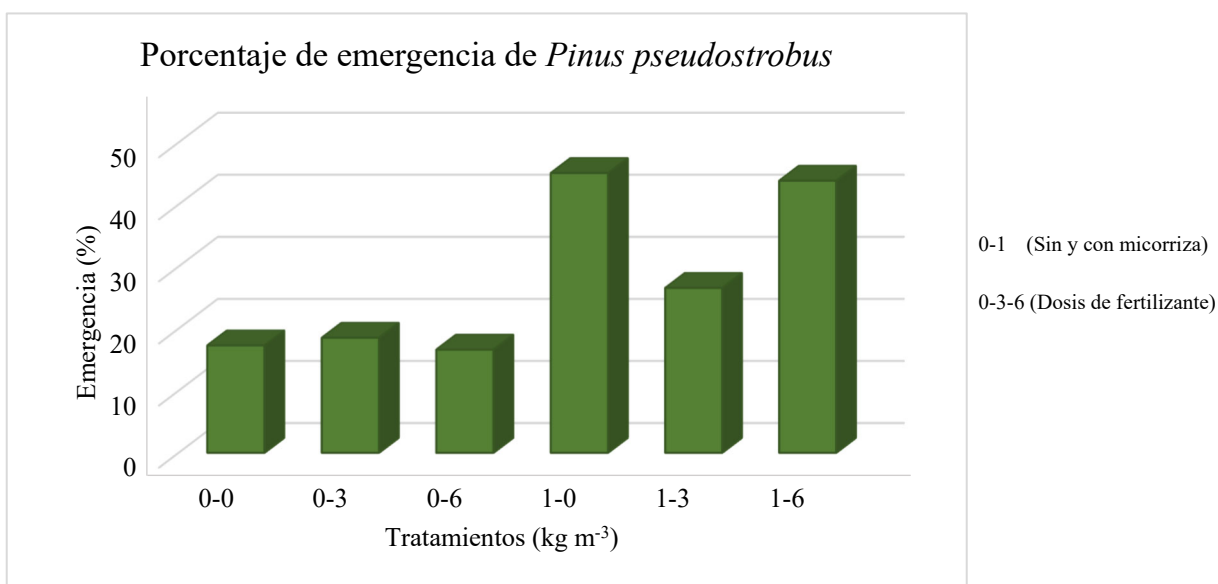


Figura 15. Porcentaje de emergencia de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en los diferentes tratamientos después de un mes de siembra.

Después de un mes desde la siembra, se aprecian la emergencia de las plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl., demostrando la viabilidad de las semillas y que se proporcionaron las condiciones óptimas para su germinación (Figura 16).



Figura 16. Emergencia de semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en los diferentes tratamientos después de un mes de siembra.

Los resultados obtenidos de esta investigación coinciden con los hallazgos de Iturriaga (2019) en su estudio comparativo de aplicación de micorriza (*Suillus luteus*) en pino (*Pinus radiata* D. Don y *Pinus patula* Schl et Cham), en el que se evaluó el efecto de la aplicación de micorriza en diferentes momentos de la emergencia y crecimiento de pinos. Los resultados mostraron que la aplicación de *Suillus luteus* el día de la siembra y después de doce días de su emergencia produjo la mayor tasa con 87 %, siguiéndole la aplicación de solo en el momento de la siembra en donde resultó un porcentaje del 86 %, mientras que la aplicación antes de la siembra resultó en una tasa de 86 %, estos tres datos fueron los mejores resultados obteniendo la mayor tasa en comparación con el testigo que tuvo un porcentaje de 75 %.

4.2 Porcentaje de colonización *Pisolithus arhizus* (%)

El cuadro 3 muestra los porcentajes de colonización micorrízica de *Pisolithus arhizus* al quinto, séptimo y noveno mes. Se puede observar que al quinto mes no había colonización visible, pero si en el séptimo y noveno mes. Los resultados demuestran que los mayores valores de colonización ocurrieron para el tratamiento inoculado más la cantidad de 3 kg m⁻³ de fertilizante, seguido del tratamiento inoculado más 6 kg m⁻³ de fertilizante y al final el tratamiento inoculado sin fertilizante.

Cuadro 3. Colonización de *Pisolithus arhizus* al quinto, séptimo y noveno mes después de la siembra de *Pinus pseudostrobus* en vivero.

Tratamiento (kg m ⁻³)	Porcentaje de colonización		
	Quinto (julio)	Séptimo (septiembre)	Noveno (noviembre)
0-0	0.0	0.0	0.0
0-3	0.0	0.0	0.0
0-6	0.0	0.0	0.0
1-0	0.0	0.0	4.8
1-3	0.0	71.4	78.6
1-6	0.0	28.5	16.4

Durante el quinto mes se realizó la evaluación en laboratorio a través del microscopio QM25, sin tener evidencia de la presencia de colonización de micorrizas de *Pisolithus arhizus*, esta observación se documentó mediante fotografías como se ilustra en la figura 17.



Figura 17. Imagen típica de las raíces al quinto mes de inoculación correspondiendo al mes de julio 2024 del tratamiento 1-3 kg m⁻³ en donde no se observó colonización de micorriza.

En el séptimo mes se analizaron otras cinco plantas de cada tratamiento con micorriza en laboratorio, con ayuda del microscopio QM25 y se observó la presencia de colonización de micorrización como se muestra en la figura 18.

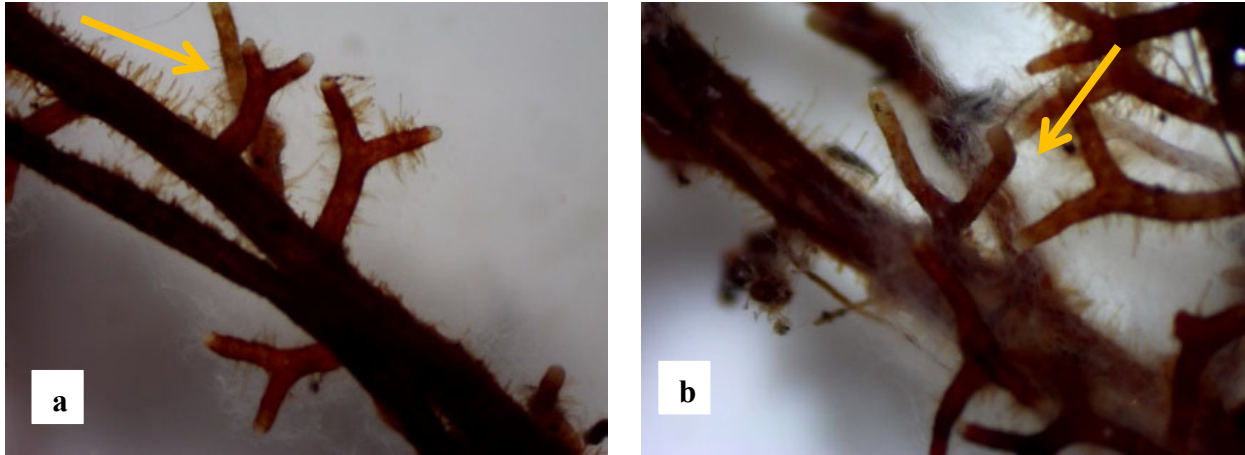


Figura 18. Aspecto general de raíces de *Pinus pseudostrobus* con presencia de colonización con *Pisolithus arhizus* al séptimo mes (septiembre) desde la siembra; a y b) corresponden al tratamiento $1-3 \text{ kg m}^{-3}$ con presencia de micorrización.

La evaluación final se realizó al noveno mes (noviembre) en laboratorio donde se observó en microscopio QM25 y se capturó en fotografías la presencia de colonización en los tratamientos $1-3 \text{ kg m}^{-3}$ y $1-6 \text{ kg m}^{-3}$ como se muestra en la figura 19.

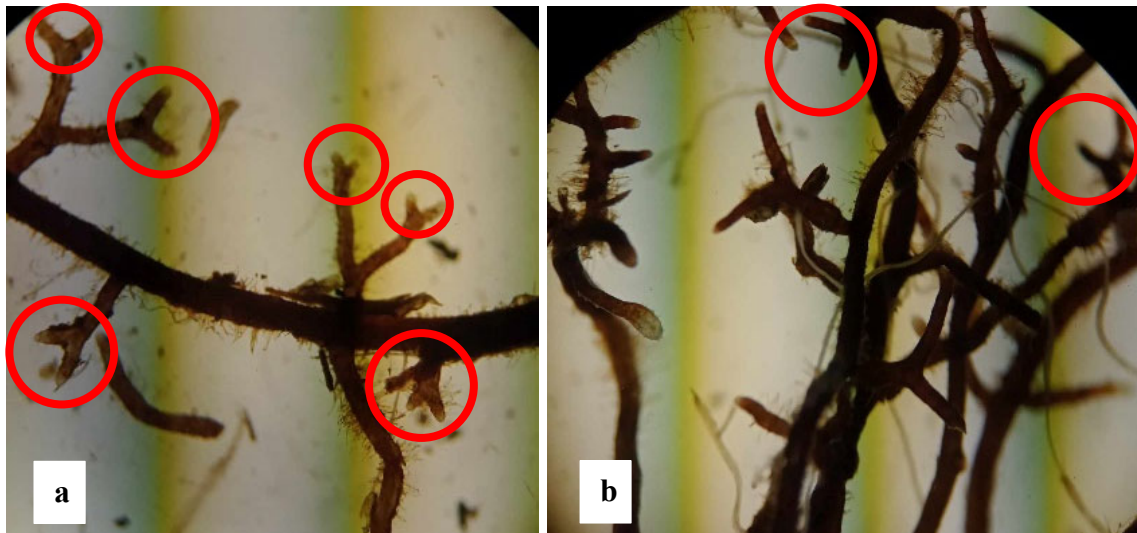


Figura 19. En el noveno mes correspondiente a noviembre, se presentó la mayor colonización de *Pisolithus arhizus* en raíces de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl.; a) Tratamiento $1-3 \text{ kg m}^{-3}$ se observa mayor colonización a comparación de b) del tratamiento $1-6 \text{ kg m}^{-3}$.

Estudios previos han demostrado que la colonización de las micorrizas puede verse afectada negativamente por los altos niveles de fertilización. En este sentido, Salcido *et al.* (2020) encontraron que la combinación de esporas de hongos nativos con la fertilización de 3 g L⁻¹ propició mejor calidad de planta por tener mayor porcentaje de micorrización. En cambio, cuando se incrementó la dosis de fertilizante a 6 g L⁻¹, se observó disminución de la misma.

Esto sugiere que la fertilización excesiva puede inhibir la colonización de las micorrizas, como se observó en la presente investigación y lo que se reporta en el estudio de Salcido *et al.* (2020). Dicho exceso de fertilización podría tener implicaciones negativas para el crecimiento y desarrollo de las plántulas en campo.

Presencia de hongos

Al quinto mes se pudo observar la presencia de hongos saprófitos los cuales son hongos que se alimentan de materia orgánica muerta o en descomposición. Los cuerpos fructíferos y a través de revisión de literatura permitió identificar a los hongos presentes como *Psilocybe mexicana* y *Cyathus olla* cuyo origen se presume sea el aserrín utilizado en el sustrato del ensayo (Figura 20 y 21).



Figura 20. *Psilocybe mexicana*.



Figura 21. *Cyathus olla*.

4.3 Respuesta a altura (cm)

Al mes de iniciado el experimento (marzo 2024) se realizó la primera medición de altura de las plántulas apenas al terminar el proceso de germinación, en la cual el testigo y el tratamiento con $1-0 \text{ kg m}^{-3}$, tuvieron 4.7 y 4.9 centímetros respectivamente, el tratamiento $1-3 \text{ kg m}^{-3}$ de fertilizante presentó mayor promedio con 5.7 centímetros de altura. En contraste, se observó que los tratamientos que incluían fertilizante de tres y seis kg m^{-3} , específicamente aquellos con *Pisolithus arhizus*, superaron hasta con 2 centímetros al tratamiento testigo.

En la segunda medición realizada en septiembre 2024 (7 meses), el testigo y el tratamiento $1-0 \text{ kg m}^{-3}$ presentaron en promedio la altura de 5.0 centímetros (Figura 22). En cambio, los tratamientos 0-6 y 1-3 presentaron en promedio 10.0 centímetros, siendo el tratamiento $1-6 \text{ kg m}^{-3}$ el que alcanzó la mayor altura con 12.3 cm de promedio.

En la medición de noviembre (9 meses) se tuvieron resultados de un centímetro de diferencia de altura para el testigo y el tratamiento $1-0$ este último con 6.05 cm, en cambio el tratamiento 0-3 presentó 16.62 cm. Las plántulas con mayor crecimiento en la misma fecha fueron del tratamiento 1-3, 0-6 y $1-6 \text{ kg m}^{-3}$ con alturas promedio de 19 cm.



Figura 22. Altura del tratamiento $0-0 \text{ kg m}^{-3}$ (testigo) en plantas de *Pinus pseudostrobus*.

Durante esta medición se observó que algunas plántulas sin fertilizante empezaron a presentar un color amarillento (Figura 23).



Figura 23. Comparación de plántulas sin y con fertilizante a) color amarillento en plántulas sin fertilizantes 0-0 kg m⁻³; b) plántulas con fertilizantes 0-3 kg m⁻³.

El cuadro 4 muestra los resultados del análisis factorial, donde se observa que a partir del séptimo mes todos los factores principales (micorrización y fertilización), así como la interacción de primer orden presentaron una diferencia estadísticamente significativa.

Cuadro 4. Análisis factorial indicando el efecto de los factores micorriza, fertilización y su interacción para la variable altura (cm) del primer mes, séptimo mes y el noveno mes.

	Marzo (1er mes)	Septiembre (7mo mes)	Noviembre (9no mes)
Fuente	Pr > F	Pr > F	Pr > F
Micorriza	0.0023	<0.0001	0.0242
Fertilización	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Micorriza*fertilización	0.3135	<0.0001	<0.0001

Posterior a este análisis factorial se realizó la prueba de comparación de medias para la combinación de los factores y niveles con el fin de valorar la mejor combinación entre ellos. Los resultados obtenidos muestran que desde el mes de marzo el tratamiento 1-6 kg m⁻³ superó en altura (7.3 cm) al resto de los tratamientos, de igual manera tuvo el mayor valor en el mes de septiembre (7mo mes) y noviembre (9no mes) después de la siembra con 12 y 19.8 cm respectivamente. Las plántulas del tratamiento testigo mostró el menor valor en altura de todo el experimento como se observa en la figura 24.

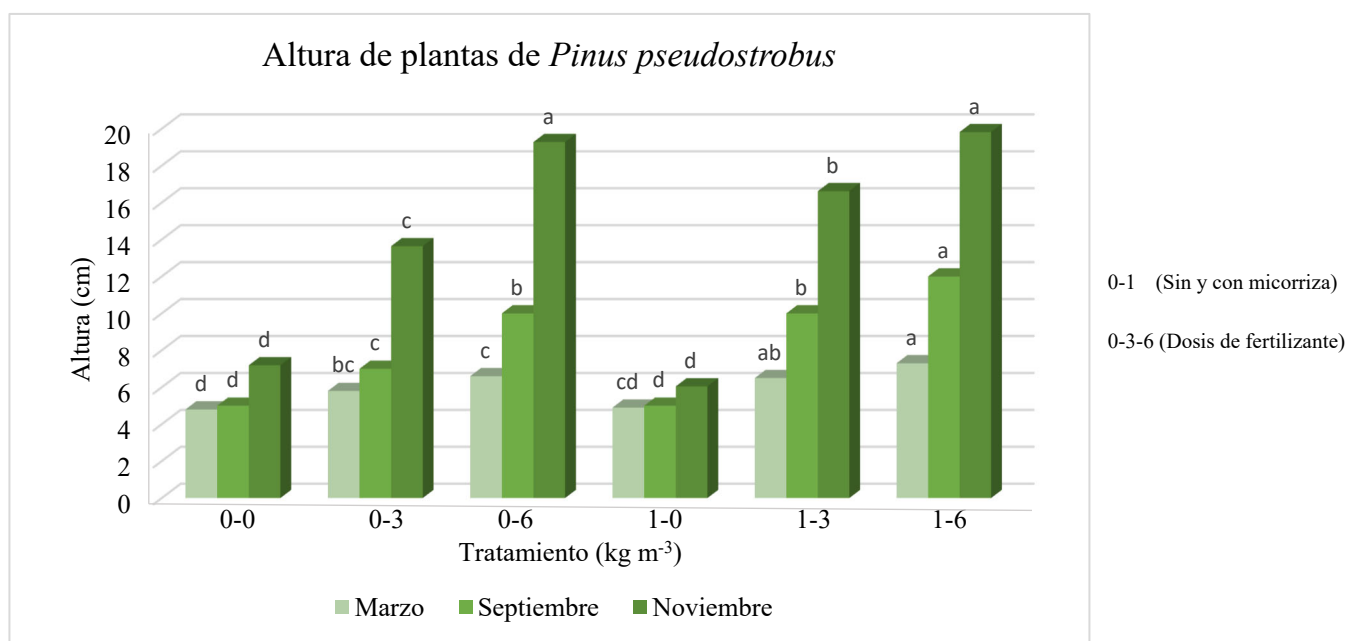


Figura 24. Valores promedio de altura en plantas sin micorrizas (0) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) y con micorriza (1) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) de *Pinus pseudostrobus* evaluados en marzo (1 mes), septiembre (7 meses) y noviembre (9 meses). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas por fecha de evaluación ($p \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que los tratamientos 0-6 y 1-6 kg m⁻³ en el mes nueve después de la siembra, presentaron la mayor altura en las plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. Lo que indica para este parámetro que el fertilizante tiene un efecto aditivo respecto al crecimiento en altura.

En el presente estudio los resultados obtenidos son similares a los que reporta Prieto *et al.* (2009) donde indica como los tratamientos con fertilizante tienen las alturas más altas en comparación con el testigo el cual reporta una altura de 6.9 cm y los tratamientos reportan hasta 18.3 centímetros de altura.

Al igual que Aguilera *et al.*, (2016) muestra resultados favorables al aplicar dos fertilizantes (multicote y osmocote), con un periodo de liberación de nutrientes de ocho a nueve meses, obteniendo crecimientos en altura de las plántulas con valores de 22 a 25 centímetros en los diez meses que permaneció el experimento.

4.4 Respuesta a diámetro (mm)

En el primer mes después de emergencia (marzo 2024) el testigo fue el que tuvo el mayor diámetro con 1.19 mm, el que quedó en segundo lugar de diámetro fue el tratamiento 1-6 kg m⁻³, en diferencia de 0-3 kg m⁻³ que obtuvo 0.06 mm.

En el séptimo mes (septiembre 2024) el testigo sigue siendo el que presenta un promedio mayor 1.22 mm de diámetro, siguiendo los tratamientos 0-3 y 0-6 kg m⁻³ con 1.07 mm, en contraste con el 1-6 kg m⁻³ que obtuvo 0.93 mm.

Para el noveno mes correspondiendo a noviembre de 2024 hubo un cambio drástico cambiando los roles de los anteriores datos, el tratamiento 1-6 junto con 0-6 kg m⁻³ obtuvieron el promedio mayor de diámetro con 3.99 mm aproximadamente, siendo los menores diámetros los tratamientos 1-0 kg m⁻³ y el testigo siendo menores a 2 mm (Figura 25).



Figura 25. Respuesta de las plantas a los tratamientos de sin y con micorrizas (0, 1) más fertilizante de liberación controlada (0,3,6) en *Pinus pseudostrobus* evaluados en noviembre (9 meses).

El cuadro 5 muestra el análisis factorial para los factores estudiados, y su interacción de primer orden. Se puede observar que para todos los meses evaluados se presenta un efecto estadísticamente significativo para el factor micorriza, fertilizante y la interacción entre ambos.

Cuadro 5. Análisis factorial indicando el efecto de los factores micorriza, fertilización y su interacción para la variable diámetro (mm) datos del primero, séptimo y noveno mes.

	Marzo	Septiembre	Noviembre
Fuente	Pr > F	Pr > F	Pr > F
Micorriza	< 0.0001	0.3600	0.0106
Fertilización	0.0009	<0.0001	<0.0001
Micorriza*fertilización	0.2548	0.0472	0.0801

Después de llevar a cabo el análisis factorial, se realizó la prueba de comparación de medias para evaluar la combinación de los factores y niveles con la finalidad de identificar cuál era la mejor combinación entre ellos. Para el parámetro diámetro en el mes de marzo y septiembre reporta que el testigo es el que presenta menores diámetros, en noviembre el tratamiento 0-6 y 1-6 kg m⁻³ muestran significativamente los mayores diámetros como se puede ver en la figura 26.

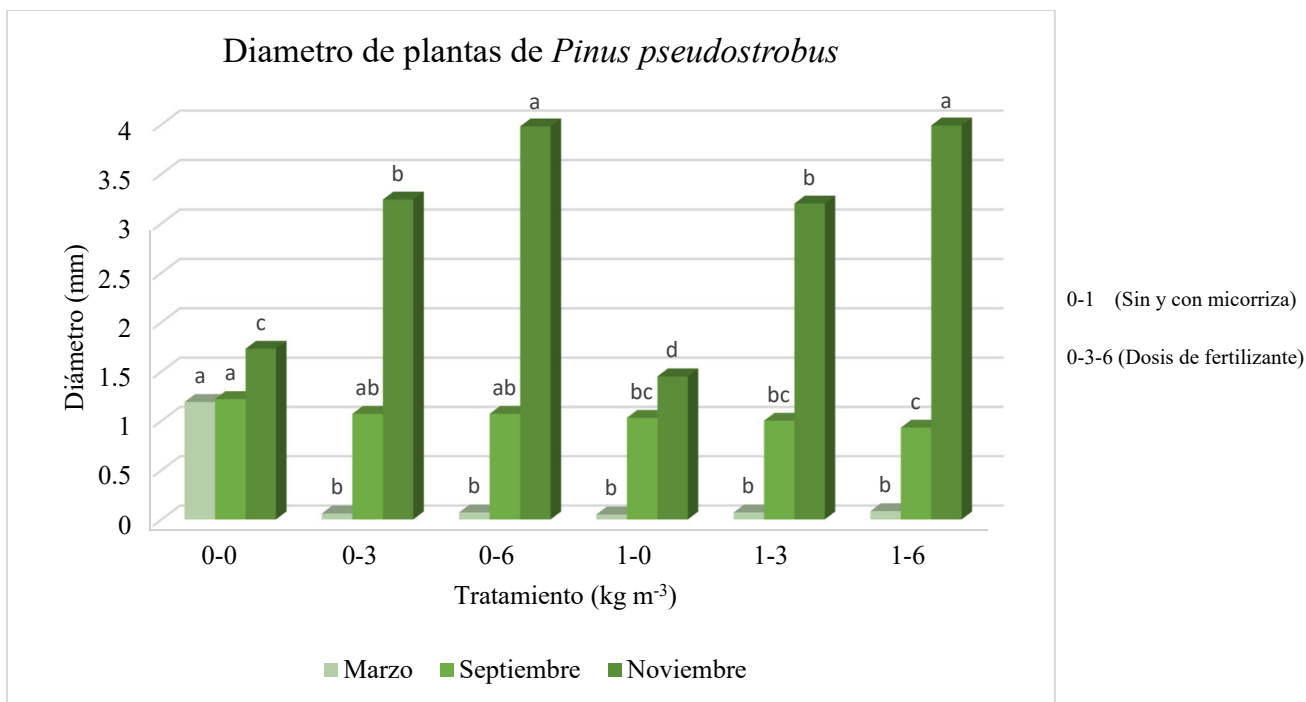


Figura 26. Valores promedio para diámetros en los meses de marzo (1 mes), septiembre (7 meses) y noviembre (9 meses). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas por fecha de evaluación ($p \leq 0.05$)

Los resultados obtenidos en los últimos meses de la investigación mostraron un beneficio significativo en el crecimiento de las plántulas fertilizadas.

Esto se corrobora con los hallazgos de Aguilera *et al.* (2016), quienes reportan plantas de buena calidad, alcanzando diámetros de hasta 5 mm utilizando dos fertilizantes con dos periodos de liberación (multicote y osmocote).

Al igual González *et al.* (2018) reportaron resultados positivos para diámetros utilizando sustrato con 46 % de turba de musgo, 54 % corteza de pino compostada y como fertilizante multicote con 18N – 6P₂O₅ – 12 K₂O + micro nutrientes, llegando alcanzar hasta los 4.2 mm.

Lo cual indica que el fertilizante puede tener un efecto beneficioso a largo plazo en el crecimiento de diámetro de las plántulas de pino.

4.5 Peso seco

4.5.1 Peso seco de la parte aérea (g)

Los resultados para el noveno mes indicaron que el tratamiento 1-6 kg m⁻³ presentó el mayor peso en seco de la parte aérea alcanzando 1.18 gramos, en contraste con el testigo, que registró el peso más bajo de 0.20 gramos. Se identificó que el tratamiento con micorriza y fertilizante (1-6 kg m⁻³) tuvo el 26.27 % más de peso seco de la parte aérea que las plantas (0-6 kg m⁻³) que no tienen micorriza y tiene fertilizante (Figura 27).

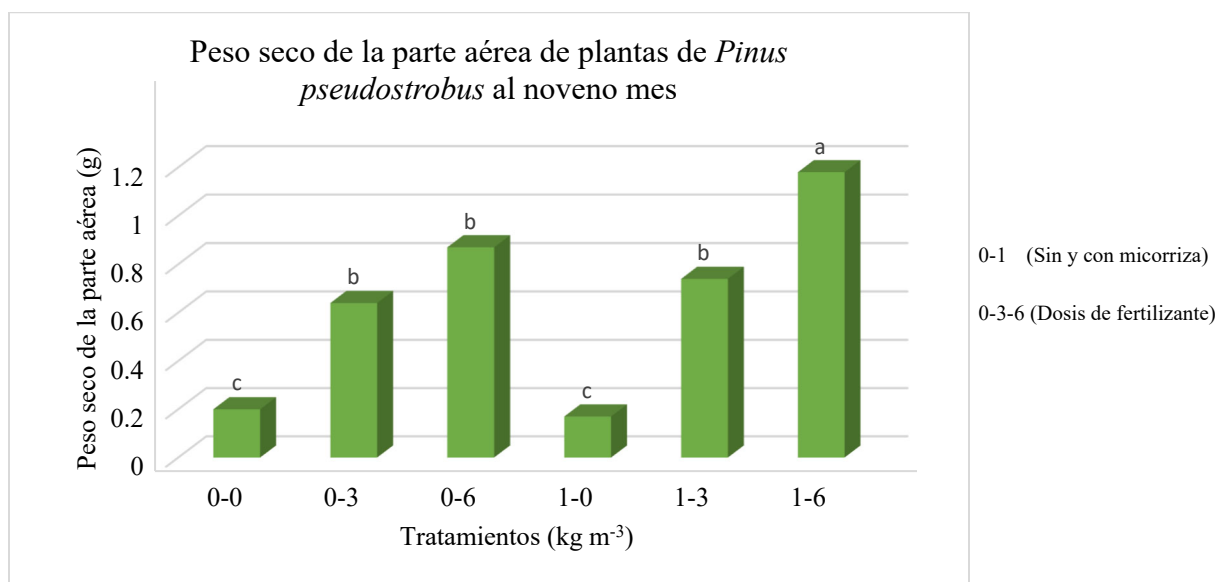


Figura 27. Peso seco de la parte aérea (gramos) al noveno mes (noviembre 2024). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

4.5.2 Peso seco de la parte radicular (g)

Los resultados en el noveno mes obtenidos coincidieron con los registrados de la parte aérea, evidenciando que el tratamiento 1-6 kg m⁻³ presentó el mayor peso de raíz alcanzando 2.63 gramos, en contraste con el testigo, que registró el menor peso con 0.17 gramos. La raíz de las plantas del tratamiento 1-6 kg m⁻³ tuvo 36.88 % más de peso seco que la raíz de las plantas del tratamiento 0-6 kg m⁻³ y 93.53 % más que el testigo (Figura 28).

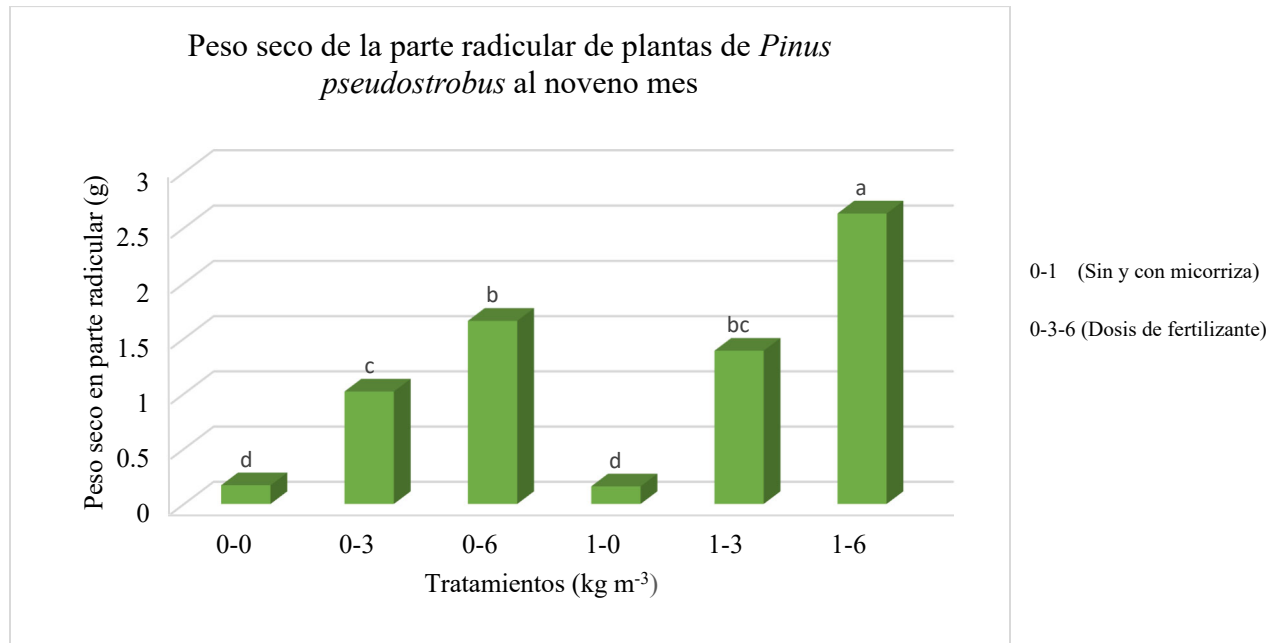


Figura 28. Peso seco de la parte radicular (gramos) al noveno mes (noviembre 2024). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

Los resultados de esta investigación muestran que las raíces micorrizadas con *Pisolithus arhizus* presentan mayor peso, después de someterse al proceso de secado en horno durante 72 horas. Estos datos se ven respaldados por los resultados obtenidos por Barragán *et al.* (2018), quienes reportan que el peso seco de la raíz en plantas inoculadas fue hasta 6.4 veces mayor en comparación con las plantas no inoculadas. Esto sugiere que el uso de micorrizas en pinos tiene efecto beneficioso en el crecimiento y desarrollo de las raíces, por lo que se puede asumir implicaciones positivas en las plántulas de pino.

4.6 Longitud de raíz (cm)

Al llevar a cabo la medición de la longitud de las raíces, se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 6), que reflejan el crecimiento y desarrollo radicular de las muestras analizadas. Estos datos son fundamentales para evaluar el efecto de los tratamientos aplicados en el estudio.

Cuadro 6. Valor promedio de longitud de raíz en plántulas de *Pinus pseudostrobus* producida en vivero con aplicación de micorriza.

Tratamiento (kg m ⁻³)	Longitud de raíz			
	Septiembre (7 ^{mo} mes)		Noviembre (9 ^{no} mes)	
	Promedio (cm)	(Desviación estándar)	Promedio (cm)	(Desviación estándar)
0-0	16	1.8	18	1.1
0-3	15	1	18	1.1
0-6	18	0.7	21	1.5
1-0	17	2.9	20	1.2
1-3	18	1.1	20	1.4
1-6	16	0.7	18	1.7

Al realizar las mediciones en de longitud de raíz en el séptimo y noveno mes, se observa la respuesta positiva por el fertilizante para este parámetro, debido a que la diferencia de todos los tratamientos va de 2 a 3 centímetros, sin embargo, el sistema radicular de estos tratamientos no se ve de la misma manera ni retienen la misma cantidad de sustrato, en la figura 29 se muestra el sistema radicular de los diferentes tratamientos con micorriza (*Pisolithus arhizus*).



Figura 29. Longitud de la parte radicular de las plántulas de *Pinus pseudostrobus* en tratamientos con micorriza: a) 1-6 kg m⁻³; b) 1-3 kg m⁻³; c) 1-0 kg m⁻³.

Iturriaga (2019) en su estudio mostró que el tratamiento con inoculo de esporas (100 g) aplicado a la semilla presentó la mayor longitud de raíz, con promedio de 46.97 cm, en comparación con el testigo, que presentó longitud de raíz promedio de 23.50 cm. Estos resultados respaldan los datos obtenidos en esta investigación, debido a que muestran el beneficio de la micorrización en el desarrollo del sistema radicular de las plántulas.

4.7 Índice de calidad de Dickson (ICD)

Para calcular el índice se aplicó la fórmula:

$$ICD = \frac{2.53 (g)}{\frac{19 (cm)}{3.99 (mm)} + \frac{0.87 (g)}{1.66 (g)}}$$

$$ICD = \frac{2.53 (g)}{4.76 cm mm + 0.52 g}$$

$$ICD = \frac{2.53 (g)}{5.28 (g) (cm) (mm)} = 0.479 cm/mm$$

Todos los datos fueron introducidos en una base de datos de Excel en donde se realizó la fórmula para la obtención de los resultados de Índice de Calidad de Dickson como se observa en cuadro 7.

Cuadro 7. Valores promedio en variables evaluadas en *Pinus pseudostrobus* de nueve meses de edad.

Tratamiento (kg m ⁻³)	P.S. Total	Altura	Diámetro	P.S. Aérea	P.S. Raíz	ICD
0-0	0.3	7.0	1.7	0.2	0.1	0.0
0-3	1.6	13.0	3.2	0.6	1.0	0.3
0-6	2.5	19.0	3.9	0.8	1.6	0.4
1-0	0.3	6.0	1.4	0.1	0.1	0.0
1-3	2.1	16.0	3.2	0.7	1.3	0.3
1-6	3.8	19.0	3.9	1.1	2.6	0.7

De acuerdo con Oliet (2000), los valores altos del Índice de Calidad de Dickson representan una mejor calidad de planta, debido a que reflejan por una parte el desarrollo vegetativo elevado y al mismo tiempo las fracciones aéreas y radicales están equilibradas. Este índice se utiliza para seleccionar plantas con proporciones óptimas y predecir su respuesta en campo.

Reyes *et al.* (2005), en su estudio “Producción de plántula de *Pinus pseudostrobus* var. *Apulcensis* en sustratos a base de aserrín” reporta un índice de calidad máximo de 0.48 cuando se utilizó un sustrato compuesto por 80 % aserrín + 20 % Peat Moss. De manera similar, en esta investigación se obtuvieron resultados análogos al utilizar un sustrato compuesto por 50 % de aserrín, 20 % Peat Moss y 15 % tezontle, lo que es posible que el aserrín y el Peat Moss tengan un buen equilibrio para tener un efecto positivo en la calidad de las plántulas de pino.

5. CONCLUSIONES

1. La aplicación de *Pisolithus arhizus* al momento de la siembra favoreció la germinación y emergencia de las plántulas de *Pinus pseudostrobus* al ocupar menor tiempo respecto a las que no fueron inoculadas.
2. Las respuestas de las plántulas a las dosis de fertilización fueron favorecidas en el crecimiento en altura y diámetro normal en comparación a las sin fertilizante a los nueve meses después de la siembra.
3. La mayor colonización de *Pisolithus arhizus* en raíces de *Pinus pseudostrobus* se presentó a los nueve meses en dosis de fertilizante de 3 kg m^{-3} , y disminuyendo en la dosis de 6 kg m^{-3} .

6. RECOMENDACIONES

1. Es recomendable que se realice un estudio de laboratorio en las plantas con el objetivo de analizar el contenido de N-P-K con el fin de corroborar que los resultados observados de las variables de crecimiento son consecuencia de una mayor absorción de estos elementos minerales. Adicionalmente para valorar si una mayor colonización implica una igual adsorción en niveles bajos y altos de fertilización.
2. Es necesario dar seguimiento con mayor tiempo respecto a los niveles de colonización micorrízica para valorar la completa aparición de rizomorfos, lo que implicaría mayor capacidad de absorción por parte de las raíces.
3. Valorar el control de las condiciones medio ambientales con el fin de acortar los tiempos de colonización.

7. REFERENCIAS

- Abad Berjón M., Noguera Murray P., & Carrión Benedito C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urrestarazu-Gavilán. Tratado de cultivo sin suelo. Pp. 113-158. Madrid (España): Mundi Prensa
- Aguilera Rodríguez M., Aldrete A., Martínez Trinidad T., & Ordaz Chaparro V. M. (2016). Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7 (34): 7-20. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.79>
- Álvarez Manjarrez J., Solís Rodríguez A. U., Villarruel Ordaz J. L., Ortega Larrocea M. & Garibay Orijel R. (2021). Mycorrhizas from the tropical dry forest and other fungal symbioses. Acta Botánica Mexicana, (128). <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1906>
- Andrade Torres A. (2010). Micorrizas: Antigua interacción entre plantas y hongos. Consultado en https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_4/PDF/11_MICORRIZAS.pdf Enero 2025.
- Baltasar Martínez D., Barroetaveña C., & Rajchenberg M. (2007). Influencia del régimen de fertilización y del momento de inoculación en la micorrización de *Pinus ponderosa* en la etapa de vivero. Bosque, 28(3), 226–233. <https://doi:10.4067/S0717-92002007000300007>
- Barbosa M., Pedroso D., Curi N., & Carneiro M. A. C. (2019). Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates? Ciencia e Agrotecnologia, 43. <https://doi: 10.1590/1413-7054201943003519>
- Barragán Soriano J. L., Pérez Moreno J., Almaraz Suárez J. J., Carcaño Montiel M. G., & Medrano Ortiz K. I. (2018). La inoculación con un hongo ectomicorrízico comestible y bacterias incrementa el crecimiento y mejora la calidad fisiológica de *Pinus montezumae*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 24(1): 3-16. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.01.010>.

- Brundrett M., Bougher Neale B. Dell T. G. & Nick M. (1996). Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Australia. ACIAR Monograph 32. <https://doi.org/10.13140/2.1.4880.5444>
- Carrillo Saucedo S. M., Puente Rivera J., Montes Recinas S., & Cruz Ortega R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, (129): 5-28. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Chandra Sharath M., Lal M., Naresh RK., Shipra Y., Rahul K., Rejendra K., Wasim Chand S., Varsha N., Chandana P. & Lavanya N. (2019). Role of polymer coated fertilizers (PCFS) an advance technology for improving nutrient use efficiency and crop productivity: A review. *International Journal of Chemical Studies* 7(6):2667– 2679. Consultado en: <https://www.chemijournal.com/archives/2019/vol7issue6/PartAR/7-6-475-496.pdf>. Mayo, 2024.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2025). Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Base de datos climatológica Nacional, Tulancingo de Bravo, estación 13041. Consultado en: https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Mensuales/hgo/mes13041.txt. Octubre, 2024.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO (2019). *Pinus pseudostrobus*. Consultado en: <https://enciclovida.mx/especies/155466-pinus-pseudostrobus>. Abril, 2024.
- Dickson, A., L. Leaf A. and F. Hosner J. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *For. Chron.* 36: 10-13. Consultado en: <https://pubs.cif-ifc.org/doi/10.5558/tfc36010-1>.
- Duñabeitia Miren K., Hormilla S., Garcia Plazaola J. I, Txarterina K., Arteche U., & Becerril J. M. (2004). Differential responses of three fungal species to environmental factors and their role in the mycorrhization of *Pinus radiata* D. Don. *Mycorrhiza*, 14(1): 11-18. Doi: 10.1007/s00572-003-0270-5

- Flores A., Pineda Ojeda T., & Flores Ayala E. (2019). Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55): 171-179. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.604>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & International Fertilizer Industry Association (IFA). (2000). *Fertilizers and their use. A pocket guide for extension officers*. 4th ed. Rome, Italy. 70 p. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2000_IFa_FAO_fertilizeruse.pdf. Septiembre, 2024.
- Franco Castro L. A. & García Conde M. R. (2012). Caracterización de las endomicorizas y siete grupos de microorganismos en agrosistemas del Piedemonte Amazónico, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 17(2): 351-364. Consultado en: <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v17n2/v17n2a10.pdf>. Abril, 2024.
- Gómez Romero Mariela, Lindig Cisneros, Roberto, & Del Val de Gortari Ek. (2015). Efecto de la sequía en la relación simbiótica entre *Pinus pseudostrobus* y *Pisolithus tinctorius*. *Botanical Sciences*, 93(4): 731–740. <https://doi.org/10.17129/botsci.193>
- González Orozco M. M., Prieto Ruíz J. Á., 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. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48): 203-225. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.125>
- Gutiérrez L. (2014). Ficha técnica: *Pisolithus arhizus*. Consultado en: https://granadanatural.com/ficha_hongos.php?cod=883. Noviembre, 2024.
- Heras Marcial M. (2021). Influencia de la fertilización en dos especies de pino en vivero y campo. (Tesis de maestría). Colegio de postgraduados. Consultado en: http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/4640/Heras_Marcial_M_MC_Ciencias_Forestales_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Marzo, 2024.
- Hernández Cuevas L., Guerra De la Cruz V., Santiago Martínez G. & Cuatlal Cuahutencos P. (2011). Propagación y micorización de plantas nativas con potencial para restauración de

suelos. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 2(7): 87-96. Consultado en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n7/v2n7a8.pdf>. Mayo, 2024.

Iturriaga Mejía J. F. (2019). Comparativo de aplicación de micorriza (*Suillus luteus*) en pino (*Pinus radiata* D. Don y *Pinus patula* Schl et Cham), en condiciones del Centro Agronómico K'ayra-Cusco (Tesis de ingeniería) Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Consultado en: https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4331/253T20190401_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Septiembre, 2024.

Khasa P. D., Sigler L., Chakravarty P., Dancik B. P., Erickson L., & Mc Curdy D. (2001). Effect of fertilization on growth and ectomycorrhizal development of container-grown and bare-root nursery conifer seedling. *New Forests*, 22(3): 179–197. doi: 10.1023/A:1015674921878

Landis Thomas D. & Dumroese Kasten R. (2009). Using polymer-coated controlled-release fertilizers in the nursery and after outplanting. *Forest Nursery Notes*. U.S. Departamento f Agriculture, Forest Service. Winter 2009:5-12. Consultado en: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_other/rmrs_2009_landis_t001.pdf. Octubre, 2024.

Landis Tomas D. (1989). Mineral Nutrients and Fertilization. *In*: Landis, T.D.; Tinus R. W.; Mc Donald, S.E.; Barnett J.P. *The Container Tree Nursery Manual*, Volume 4 Agric. Handbbk. 674. Washington, DC. US. Departament of Agriculture, Forest Service: 1-67.

Márquez Fernández O., Herrera E., Castellanos Onorio O., Estrada Torres A., & Trigos Á. (2013). Identificación de un derivado de lanosterol procedente del hongo cultivado *Pisolithus arhizus* (Scop.) Rauschert. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente XIX (2)*: 217-224. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.10.056>

Medrano Echalar A. M. & Ortuño N. (2007). Control del Damping off mediante la aplicación de bioinsumos en almácigos de cebolla en el Valle Alto de Cochabamba – Bolivia. *ACTA NOVA*; Vol. 3, N°4: 660-679. Consultado en: <http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v3n4/v3n4a03.pdf>. Junio, 2024.

- Michael J. (2005). Google Earth Pro. Consultado en: <https://www.google.es/intl/es/earth/versions/>. Enero, 2025.
- Minitab LLC. (2017). Minitab Statistical Software (Version 18) [Computer software]. Consultado en: <https://www.minitab.com>. Septiembre 2024.
- Newsham K. K., Fitter A. H., & Watkinson, A. R. (1995). Arbuscular mycorrhiza protect an annual grass from root pathogenic fungi in the field. *Journal of Ecology*, Vol. 83, No.6: 991-1000. <https://doi.org/10.2307/2261180>.
- Norma mexicana (2016). NMX-AA-170-SCFI-2016, Certificación de la operación de Viveros Forestales. Consultado en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-170-SCFI-2016.pdf>. Octubre, 2024.
- Oliet Palá J. A. (2000). La calidad de la postura forestal en vivero. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes de Cordoba. España. Junio, 2024.
- Oliet J. A., Puértolas J., Planelles R., & Jacobs, D. F. (2013). Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: A Mediterranean perspective. *New Forests*, 44(5), 649-669. doi: 10.1007/s11056-013-9382-8. Julio, 2024.
- Pastor Sáez J. N. (1999). Utilización de sustratos en viveros. *Terra Latinoamericana*, vol. 17: núm. 3: 231-235. Consultado en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317307.pdf>. Marzo, 2024.
- Pérez Moncada U. A., Ramírez Gómez M., Serralde Ordoñez D. P., Peñaranda Rolón A. M., Wilches Ortiz Wilmar A., Ramírez L., & Rengifo Estrada G. A. (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>.
- Porcel R., Aroca R., & Ruiz Lozano J. M. (2012). Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 32(1): 181–200. Doi: 10.1007/S13593-011-0029-X

- Prieto Ruiz J. Á., García Rodríguez J. L., Mejía Bojórquez J. M., Huchín Alarcón S. & Aguilar Vitela J. L. (2009). Producción de planta del género *Pinus* en vivero en clima templado frío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro Campo Experimental Valle del Guadiana. Núm. 28. Abril, 2024.
- Quiroz Marchant I., Chung Guin po P., García Rivas E., González Ortega M. & Soto Guevara H. (2009). Vivero Forestal: Producción de plantas nativas a raíz cubierta. Santiago, Chile: INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17366>.
- Rauschert S. V. (1959). Beitrag zur Nomenklatur mitteleuropäischer Gasteromyceten. Zeitschrift für Pilzkunde. Vol. 25, Núm. 2. Pag. 50-55. Consultado en: https://www.zobodat.at/pdf/Z-Pilzkunde_25_1959_0050-0055.pdf. Junio 2024.
- Revolution Plant. (2019). Understanding How Mycorrhizal Works and 10 Ways Your Garden Can Benefit from These. Plant revolution. Consultado en: https://plantrevolution.com/blogs/news/why-need-mycorrhizal-in-garden?srsltid=AfmBOop4JP_Dh_xCy6sjjncQ92hhht_2chl1rPjaeCONku7clv52oxlb. Junio, 2024.
- Reyes Reyes J., Aldrete A., Cetina Alcalá V. M., & López Upton J. (2005). Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* var. *Apulcensis* en sustratos a base de aserrín. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 11(2): 105-110. Consultado en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911205>. Marzo, 2024.
- Rodríguez Laguna R. (2010). Manual de Prácticas de Viveros Forestales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 52 p. Consultado en: https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Rodri_Laguna/2.pdf. Marzo, 2024.
- Rose R., Haase D. & Arellano E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. Bosque. 25:89-100. Consultado en: <https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v25n2/Art09.pdf>. Abril, 2024.

- Salcido Ruiz S., Prieto Ruiz J. Á., García Rodríguez J. L., Santana Aispuro E., & Chávez Simental J. A. (2020). Mycorrhiza and fertilization: effect on the production of *Pinus engelmannii* Carr. in nursery. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 26(3): 327-342. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.080>.
- Salgado Salomón M. E., Rajchenberg M. & Barroetaveña C. (2009). Evaluación del estado micorrícico de plántulas de *Pinus ponderosa* producidas bajo fertirriego, sin manejo de la micorrización. Bosque. 30(3): 127–134. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000300002>.
- Salmiaton A., Firoozeh D. (2015). Controlled-Release Fertilizers: Advances and Challenges. Life Science Journal 12 (11): 33–45. <https://doi.org/10.7537/marslsj121115.05>
- Sandoval García R., González Cubas R. & Bautista Cruz A. (2020). Asociación ecológica de *Pinus pseudostrobus* (Pinaceae) como respuesta de las variaciones biogeográficas en el Centro-Sur de México. Acta Botanica Mexicana, 127 p. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1627>
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO). (2007). Manual de producción de planta forestal. Clima templado. Consultado en: http://www.earthgonomic.org/biblioteca/2007_SEDAGRO_Manual_de_Produccion_Forestal.pdf. Abril, 2024.
- Smith S. & Read D. (2010). Mycorrhiza l Symbiosis. 3rd. ed. Elsevier. London, UK. 803 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Sosa Rodríguez T., Sánchez Nieve J., Morales Gutiérrez E. & Cruz Cortés F. (2006). Interacción micorrizas arbusculares-*Trichoderma harzianum* (Moniliaceae) y efectos sobre el crecimiento de *Brachiaria decumbens* (Poaceae). Acta Biológica Colombiana. 11(1): 43–54. Consultado en: <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v11n1/v11n1a04.pdf>. Junio, 2024.
- Trappe James M. (1977). Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries. Annual Review of Phytopathology. (15): 203–222. doi: 10.1146/annurev.py.15.090177.001223
- Vázquez Chacón J. Y. (2023). *Pinus pseudostrobus*. Lifeder. Consultado en: <https://www.lifeder.com/pinus-pseudostrobus/> Febrero, 2024.