



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN CIENCIAS FORESTALES

MAESTRIA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN UN
ECOSISTEMA FORESTAL Y SU RESTAURACIÓN MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE HONGOS ECTOMICORRÍZICOS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

DAFNE FERNANDA JUÁREZ ZAVALA

Bajo la supervisión de: ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA, DRA.



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**

Chapingo, Estado de México, octubre de 2025



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN UN ECOSISTEMA FORESTAL Y SU
RESTAURACIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HONGOS ECTOMICORRÍZICOS**

Tesis realizada por Dafne Fernanda Juárez Zavala bajo la supervisión del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTORA: _____



DRA. ELIZABETH HERNANDEZ ACOSTA

CODIRECTOR: _____



Ph. D. JESÚS PERÉZ MORENO

ASESOR: _____



Ph. D. CARLOS LEOPOLDO CÍNTORA GONZÁLEZ

CONTENIDO

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
DATOS BIBLIOGRÁFICOS	X
RESUMEN GENERAL.....	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Delimitación del problema	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.5.1. Hipótesis central.....	4
1.5.2. Hipótesis específicas	4
1.6. Literatura citada.....	5
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. Marco teórico.....	7
2.1.1. Impacto ambiental.....	7
2.1.1.1. Evaluación del Impacto Ambiental	7
2.1.1.2. Medidas preventivas, correctoras o mitigantes y compensatorias	8
2.1.1.3. Indicadores para evaluar el impacto ambiental.....	8
2.1.1.4. Metodología Presión-Estado-Respuesta (PER).....	9
2.1.1.5. Metodología Presión-Estado-Respuesta en recursos forestales	11
2.1.2. Ecosistemas degradados: manifestación de los impactos ambientales	12
2.1.2.1. Alternativas para revertir el deterioro de los ecosistemas.....	12
2.1.2.2. Restauración ecológica como mitigación al impacto ambiental	13
2.1.2.3. Importancia de las micorrizas en la rehabilitación de un ecosistema.....	14
2.1.2.4. Interacción suelo-planta-microorganismos	15
2.1.2.5. Análisis de fertilidad del suelo según los lineamientos oficiales en México	15
2.1.3. Simbiosis micorrízica, una práctica de la restauración ecológica.....	16
2.1.3.1. Tipos de micorrizas.....	16

2.1.3.2. Ectomicorrizas	18
2.1.3.4. Caracterización morfoanatómica de ectomicorrizas	20
2.1.3.5. Los hongos ectomicorrízicos en ecosistemas forestales	21
2.1.4. Descripción de las especies de estudio	22
2.1.4.1. <i>Pinus greggii</i> Engelm.	22
2.1.4.2. <i>Pinus oocarpa</i> Schiede	23
2.1.4.3. <i>Pinus maximartinezii</i> Rzedowski.....	24
2.1.4.4. <i>Suillus kaibabensis</i> Thiers	25
2.1.4.5. <i>Laccaria laccata</i> (Scop.) Coke	26
2.1.4.6. <i>Hebeloma mesophaeum</i> (Pers.) Qué!.....	27
2.4. Literatura citada.....	28
CAPÍTULO 3. Modelo Presión-Estado-Respuesta para el diagnóstico de impactos ambientales y gestión en un ecosistema forestal protegido*	37
CAPÍTULO 4. Ectomicorrizas en suelos rehabilitados: Persistencia de morfotipos e influencia en la fertilidad del suelo	61
CAPÍTULO 5. Caracterización física y química de un suelo forestal restaurado con pinos ectomicorrizados en un área natural protegida*	81
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES	98
Anexos.....	99

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Técnicas de rehabilitación de ecosistemas.....	12
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo PER	9
Figura 2. Esquema PER en sectores forestales en México.....	11
Figura 3. Tipos de micorrizas.	17
Figura 4. Función de las ectomicorrizas	19

LISTA DE FIGURAS CAPITULO 3

Figura 1. Ubicación y zonificación del PNMFN.....	41
Figura 2. Modelo Presión-Estado-Respuesta aplicado en el PNMFN con un enfoque a su ecosistema forestal.....	45

LISTA DE FIGURAS CAPITULO 4

Figura 1. Árboles inoculados con ectomicorrizas según su interacción fitobiote-micobionte	65
Figura 2. Puntos de muestreo enumerados considerados para la extracción de raíces ectomicorrizadas	66
Figura 3. Proceso de extracción de muestras para obtener ectomicorrizas de los Pinos	67
Figura 4. Características morfoanatómica de las raíces ectomicorrizadas	74

LISTA DE CUADROS CAPITULO 4

Cuadro 1. Valores promedio de las variables morfológicas en árboles micorrizados (n=61)	70
Cuadro 2. Estimaciones puntuales e intervalos de confianza no paramétricos.	75

LISTA DE FIGURAS CAPITULO 5

Figura 1. Puntos de muestreo en suelos del sistema radical de árboles micorrizados y sus equivalentes (suelos a distancia).....	85
Figura 2. Propiedades físicas y químicas y sus medianas correspondientes en suelos del sistema radical de árboles micorrizados y suelos a distancia.....	93

LISTA DE CUADROS CAPITULO 5

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de suelos del sistema radical de árboles micorrizados	87
Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de suelos a distancia del árbol micorrizado.....	89
Cuadro 3. Medianas y comparación estadística de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante la prueba de Wilcoxon	90

DEDICATORIA

Con todo mi cariño, a mis papás, que son mi raíz y fortaleza; a mi querido David, mi apoyo y amor incondicional; mi Suk, que alegra mis días. Y, sobre todo, a la madre naturaleza, sabia y generosa, que con su fuerza y abundancia hace posible todo lo que somos y tenemos.

¡Los amo mucho!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado, el cual fue fundamental para la realización de esta investigación. Este respaldo no solo permitió llevar a cabo el trabajo académico, sino que también representó un impulso invaluable para alcanzar este objetivo profesional y fortalecer mi formación como investigadora.

A mi alma máter, la **Universidad Autónoma Chapingo**, que me ha brindado tantas oportunidades en la vida para ser quien soy hoy en día, dándome cobijo durante tantos años y permitiéndome crecer tanto en lo profesional como en lo personal.

Al **Posgrado en Ciencias Forestales**, por otorgarme la oportunidad de desarrollar un tema de investigación que, además de contribuir al cuidado y desarrollo ambiental, representa una verdadera pasión en mi vida.

A la **Dra. Elizabeth Hernández Acosta**, mi más sincero agradecimiento y cariño. Su guía, paciencia, apoyo constante, pero sobre todo la confianza depositada en mí, han sido pilares fundamentales durante este camino. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba, por acompañarme con empatía y por compartir no solo conocimiento, sino también inspiración y ejemplo de vida. Siempre le estaré profundamente agradecida.

Al **Dr. Jesús Pérez Moreno**, quien desde el primer instante me brindó su apoyo y confianza, además de transmitirme su valioso conocimiento en un tema que despertó en mí un mayor deseo de contribuir al bienestar del medio ambiente.

Al **Dr. Carlos Leopoldo Cintora González**, por su orientación y contribución invaluable en mi formación como Maestra en Ciencias, así como por el tiempo y la dedicación que fortalecieron el desarrollo de este trabajo.

A la **Dra. Magdalena Martínez Reyes**, por compartirme tanto, por su apoyo y, sobre todo, por su pasión y amor hacia todo lo que hace, que me ha inspirado profundamente.

A la **Dra. Violeta Carrasco**, por su disposición y por enseñarme tanto en este grandioso tema del cual me enamoré profundamente.

A **Magaly**, por su siempre amable apoyo durante el desarrollo de esta etapa de mi maestría.

Al **Geógrafo Agustín Tagle**, director del Parque Nacional Molino de Flores, por las facilidades institucionales brindadas y su valioso apoyo durante el desarrollo del estudio. A la Brigadista **Magdalena García**, cuyo conocimiento especializado del área de estudio fortalecieron los resultados planteados. Finalmente, al **Parque Nacional Molino de**

Flores Nezahualcóyotl por permitir la realización de la investigación dentro de su territorio y por las acciones de conservación que inspiran este trabajo.

Asimismo, deseo expresar un agradecimiento muy especial a **Sarahi Flores**, con quien se formó una valiosa amistad y cuyo apoyo fue fundamental en los momentos más difíciles de este proceso.

Se agradece al **Colegio de Postgraduados**, Proyecto CONV_ENASAS_2025_29 por su apoyo financiero, y al laboratorio de micorrizas del Programa de Edafología por las facilidades otorgadas.

Al **laboratorio de biontecnología ambiental** del Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, por facilitar la ejecución de todos los procesos metodológicos llevados a cabo en esta investigación.

A cada uno, los llevaré siempre presente ¡Gracias por tanto!

Esta tesis formó parte del proyecto “*Rehabilitación de ecosistemas forestales con ectomicorrizas: estrategia de mitigación de impactos ambientales*”, con clave 25100-C-73, de la Universidad Autónoma Chapingo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Dafne Fernanda Juárez Zavala

Fecha de nacimiento: 24 de febrero de 1996

Lugar de nacimiento: Estado de México

CURP: JUZD960224MMCRVF03

Profesión: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

Cédula profesional: 11946057

Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN UN ECOSISTEMA FORESTAL Y SU RESTAURACIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HONGOS ECTOMICORRÍZICOS

La degradación edáfica afecta los ecosistemas forestales; en México, se estima que más del 60% de los suelos están deteriorados. Esta situación se agrava por presiones que alteran procesos ecológicos y comprometen la salud del ecosistema. Ante este panorama, el uso de hongos ectomicorrízicos comestibles en programas de reforestación representa una alternativa biotecnológica eficiente para restaurar suelos degradados. El objetivo de este estudio fue implementar el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN) para medir el impacto ambiental y evaluar la rehabilitación de un área forestal degradada mediante la inoculación de hongos ectomicorrízicos, como estrategia para mitigar y revertir la degradación. El diagnóstico PER integró entrevistas al director del parque y personal técnico especializado, encuestas a visitantes y observaciones de campo, identificando las presiones ambientales, el estado del ecosistema y estrategias de manejo. Se evaluó la persistencia de la simbiosis ectomicorrízica tras nueve años y seis meses de la reforestación mediante la caracterización morfoanatómica de las estructuras fúngicas en raíces de *Pinus greggi*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii*, inoculados con *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum*. Se realizaron análisis físicos y químicos conforme la NOM-021-RECNAT-2000, comparando suelos del área radical con sitios no manejados a dos metros de distancia. Las diferencias se evaluaron con la prueba de Wilcoxon ($\alpha=0.05$), adecuada para muestras relacionadas sin requerir normalidad ni homogeneidad de varianzas. Los resultados revelaron que, pese a las presiones ambientales, el ecosistema mantiene resiliencia. La persistencia de las estructuras ectomicorrízicas y las mejoras edáficas confirman el potencial de esta biotecnológica como una estrategia efectiva sostenible para restaurar ecosistemas con suelos degradados.

Palabras clave: degradación edáfica, simbiosis ectomicorrízica, reforestación.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT IN A FOREST ECOSYSTEM AND ITS RESTORATION THROUGH THE APPLICATION OF ECTOMYCORRHIZAL FUNGI

Soil degradation has a detrimental impact on forest ecosystems; in Mexico, it is estimated that more than 60% of soils are degraded. This problem is further exacerbated by anthropogenic pressures that disrupt ecological processes and compromise overall ecosystem health. In this context, the incorporation of edible ectomycorrhizal fungi into reforestation programs offers an effective biotechnological alternative for restoring degraded soils. The objective of this study was to apply the Pressure-State-Response (PSR) framework in Molino de Flores Nezahualcóyotl National Park (PNMFN) to assess environmental impacts and evaluate the rehabilitation of a degraded forest area through the inoculation of ectomycorrhizal fungi, as a strategy to mitigate and reverse degradation. The PSR assessment incorporated interviews with the park director and specialized technical staff, visitor surveys, and field observations, thereby identifying environmental pressures, ecosystem conditions, and management strategies. The persistence of the ectomycorrhizal symbiosis was evaluated nine years and six months after reforestation through the morpho-anatomical characterization of fungal structures on the roots of *Pinus greggii*, *P. oocarpa*, and *P. maximartinezii* inoculated with *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis*, and *Hebeloma mesophaeum*. Physical and chemical analyses were conducted in accordance with the official Mexican standard NOM-021-RECNAT-2000, comparing rhizosphere soil with soil from unmanaged sites located two meters away. Differences were evaluated using the Wilcoxon test ($\alpha=0.05$), a non-parametric method suitable for related samples that does not assume normality or homogeneity. The results revealed that, despite environmental pressures, the ecosystem maintains resilience. The persistence of ectomycorrhizal structures together with the observed edaphic improvements, confirms the potential of this biotechnological approach as an effective and sustainable strategy for restoration of ecosystems on degraded soils.

Keywords: Soil degradation, Ectomycorrhizal symbiosis, Reforestation; Ecosystem restoration.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

La conservación de los ecosistemas desempeña un papel de suma importancia en la mitigación de las problemáticas ambientales causadas por el desarrollo antropogénico, asegurando la funcionalidad y continuidad de los servicios ecosistémicos esenciales (Smith et al., 2021), como la provisión de agua potable, la regulación climática y el sustento de la biodiversidad (Verma et al., 2020). Dichos servicios son fundamentales para satisfacer las necesidades básicas del ser humano y enfrentar los desafíos que trae el cambio global (Liu et al., 2022). Sin embargo, el crecimiento demográfico, la urbanización y las actividades económicas de la sociedad han generado impactos ambientales negativos, incluidas el cambio de uso de suelo, la deforestación, contaminación acuática, edáfica y de aire, y la disminución o pérdida de la biodiversidad, generalmente debido a la mala planificación o el uso desmesurado de los recursos naturales (Newbold et al., 2020).

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) ha surgido como una herramienta esencial de política ambiental para prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, regulando actividades que puedan generar efectos adversos a la salud ambiental de los ecosistemas (SEMARNAT, 2018). Con este proceso se permite identificar los impactos de proyectos y actividades humanas, promoviendo medidas para su prevención o mitigación (Gómez-Bruna et al., 2023). Con el objetivo de analizar el estado de los ecosistemas y los efectos de las actividades humanas en ellos, el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), desarrollado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), proporciona un marco analítico sólido (OCDE, 2017). En este modelo se utilizan indicadores para responder 3 preguntas clave: ¿Qué está afectando al ambiente?, ¿Qué está pasando con el estado del ambiente? y ¿Qué se está haciendo sobre las problemáticas? (Álamos et al., 2024). El esquema PER ayuda a facilitar la comprensión de las relaciones de las actividades humanas, los cambios en los ecosistemas y las respuestas sociales para reducir o prevenir impactos (Wan et al., 2024).

En cuanto a los ecosistemas forestales degradados o perturbados, la restauración ecológica es una estrategia de gran prioridad. La reforestación, definida como el

establecimiento de especies vegetales en áreas degradadas, es una práctica extensamente utilizada en la recuperación de suelos, biodiversidad y ecosistemas (Veldkamp et al., 2020). Recientes investigaciones destacan el gran valor de los hongos ectomicorrízicos comestibles (HEC) en la restauración forestal, debido a que mejoran significativamente la supervivencia de las plantas, la absorción de agua y nutrientes, la resistencia de los árboles ante condiciones de estrés abiótico como sequías, aumentan la tolerancia ante fitopatógenos y reducen la toxicidad de contaminantes en el suelo (Aguirre-Zamora et al., 2021; Tedersoo et al., 2020). Debido a lo anterior, estos microorganismos son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas forestales, favoreciendo la resiliencia de las especies vegetativas frente a condiciones adversas (McCormick et al., 2018).

El objetivo de esta investigación es implementar el modelo Presión-Estado-Respuesta en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN) para medir el impacto ambiental y evaluar la rehabilitación de un área forestal degradada mediante la inoculación de hongos ectomicorrízicos comestibles, como estrategia para mitigar y revertir la degradación.

1.1. Delimitación del problema

Debido a la creciente degradación en los espacios naturales en la región de Texcoco, surge la necesidad de identificar los principales agentes que provocan daños al ambiente. Una vez reconocidas estas presiones, es indispensable aplicar medidas preventivas y de mitigación que favorezcan la conservación de los recursos naturales. Sin embargo, la complejidad y empobrecimiento de los suelos de la zona limitan la efectividad de las estrategias tradicionales de rehabilitación ecosistémica, como las reforestaciones. Por lo que es fundamental el estudio de tecnologías alternativas, como el uso de hongos ectomicorrízicos comestibles, que contribuyan con el restablecimiento de la funcionalidad ecológica de los ecosistemas en sitios con suelos degradados.

1.2. Antecedentes

La conservación de los ecosistemas se presenta como una prioridad crucial en la lucha contra los daños ambientales, garantizando la prestación de servicios ambientales esenciales para la humanidad. Sin embargo, el desarrollo humano ha generado una serie

de impactos negativos en los ecosistemas, como la modificación de hábitats, la deforestación y la contaminación, destacando la necesidad de identificar y abordar estos problemas para proteger los recursos naturales (Oraon et al., 2023; Arneth, 2021). En este contexto, la evaluación del impacto ambiental, mediante herramientas como el modelo Presión-Estado-Respuesta, se presenta como una medida fundamental para comprender las interacciones entre las actividades humanas y el medio ambiente, permitiendo la implementación de medidas de mitigación y restauración (SEMARNAT, 2011; Vázquez-Valencia et al., 2018).

Dentro de estas medidas, la reforestación (CONAFOR, 2024) y el uso de HEC emergen como estrategias clave para rehabilitar ecosistemas degradados y rehabilitar la salud de los suelos (Arancibia et al., 2022). Debido a esto la investigación propuesta tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl y proponer la aplicación de biotecnología de inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles como una estrategia efectiva para revertir la degradación del suelo del ecosistema.

1.3. Justificación

En un contexto donde los ecosistemas del mundo están amenazados cada vez más por las actividades que desempeñan los humanos, investigar y comprender estudios sobre impactos ambientales negativos en áreas naturales protegidas como el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl es crucial. Esta investigación aborda una problemática local de gran relevancia y contribuye al conocimiento general sobre la conservación de ecosistemas degradados, así como medidas de mitigación a impactos ambientales.

La aplicación del modelo Presión-Estado-Respuesta proporciona un marco sólido para evaluar de manera integral estos impactos y diseñar estrategias efectivas de mitigación y restauración. Además, la propuesta de utilizar biotecnología de inoculación con HEC como una medida de rehabilitación ecológica representa una oportunidad innovadora para restaurar la salud de los suelos y promover la regeneración forestal en el parque.

Por lo tanto, esta investigación no sólo contribuirá al conocimiento científico sobre la gestión y conservación de áreas protegidas, sino que también proporcionará recomendaciones prácticas y basadas en evidencia para mejorar la efectividad de las

estrategias de conservación en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl y otros ecosistemas similares.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN) para medir el impacto ambiental y evaluar la rehabilitación de un área forestal degradada mediante la inoculación de hongos ectomicorrízicos, como estrategia para mitigar y revertir la degradación.

1.4.2. Objetivos específicos

- Aplicar el modelo PER de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en el PNMFN para identificar los impactos ambientales.
- Caracterizar el área forestal rehabilitada mediante la inoculación de hongos ectomicorrízicos comestibles en el PNMFN, para ubicar su influencia en el desarrollo de las coníferas y en las características del suelo.
- Realizar una caracterización morfoanatómica de las ectomicorrizas presentes en los árboles inoculados y plantados, con el fin de identificar especies de hongos que contribuyan a la recuperación de suelos degradados.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis central

La implementación del modelo Presión-Estado-Respuesta en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl permitirá medir el impacto ambiental y la rehabilitación del área forestal mediante la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles la cual permite revertir su degradación.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La aplicación del modelo PER de la OCDE en el PNMFN identificará los impactos ambientales presentes en el área.

- La caracterización del área forestal rehabilitada mediante la inoculación de HEC en el PNMFN revelará una influencia positiva en el desarrollo de las coníferas y en la mejora de las características del suelo.
- La caracterización morfoanatómica de las ectomicorrizas presentes en los árboles inoculados y plantados permitirá identificar especies de hongos que contribuyen significativamente a la recuperación de suelos degradados.

1.6. Literatura citada

- Aguirre-Zamora, M., Pérez-Moreno, J., López-Lozano, N. E., Barragán-Soriano, J. L., & Delgadillo-Martínez, J. (2021). La inoculación de *Pinus greggii* con el hongo ectomicorrícico *Laccaria laccata* favorece a las comunidades nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Biotechnia*, 23(2), 5–10. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1302>
- Álamos, N., Barría, P., Siegmund, A., Arumí, J. L., Figueroa, R., & Urrutia, R. (2024). The influence of human activities on streamflow reductions during the megadrought in central Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(11), 2483–2503. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2483-2024>
- Arancibia, R., Flores, M. E., Cabrera, T., Beiza, J. S., & Obando, J. (2022). Evaluación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la rehabilitación ecológica de ecosistemas con actividad minera. *Ecosistemas*, 31(2), 2304-2304. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2304>
- Arneth, A., Olsson, L., Cowie, A., Erb, K.-H., Hurlbert, M., Kurz, W. A., Mirzabaev, A., & Rounsevell, M. D. A. (2021). Restoring degraded lands. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 569–599. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-054809>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2024). Manual de prácticas de reforestación. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Manual_Practicas_de_Reforestacion.pdf
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Gómez-Bruna, D., Martín-Duque, C., Alzua-Sorzabal, A., & Ruiz-Rua, A. (2023). PSR_{ti} model, an adapted pressure-state-response (PSR) framework for measuring tourism impacts: the case of Madrid. *International Journal of Tourism Cities*. <https://doi.org/10.1108/ijtc-01-2023-0004>.
- Liu, M., Wei, H., Dong, X., Wang, X., Zhao, B., & Zhang, Y. (2022). Integrating Land Use, Ecosystem Service, and

Human Well-Being: A Systematic Review. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su14116926>.

- McCormick, M. K., Whigham, D. F., & Canchani-Viruet, A. (2018). Mycorrhizal fungi affect orchid distribution and population dynamics. *New Phytologist*, 219(4), 1207-1215..
<https://doi.org/10.1111/nph.15223>
- Newbold, T., Hudson, L. N., Arnell, A. P., Contu, S., De Palma, A., Ferrier, S., Hill, S. L. L., Hoskins, A. J., Lysenko, I., Phillips, H. R. P., Burton, V. J., Chng, C. W. T., Emerson, S., Gao, D., Pask-Hale, G., Hutton, J., Jung, M., Sanchez-Ortiz, K., Simmons, B. I., ... Purvis, A. (2020). Climate and land-use change as drivers of global biodiversity loss. *Nature Ecology & Evolution*, 4(3), 350–359.
<https://doi.org/10.1038/s41559-019-1071-2>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). (2017). *OECD environmental performance reviews: Mexico 2013*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264208292-en>
- Oraon, P. R., Sagar, V., & Beauty, K. (2023). Ecological restoration of degraded land through afforestation activities. In *Land and environmental management through forestry* (pp. 201–216). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119910527.ch8>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México*.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual2.html
- Smith, P., Arneeth, A., Barnes, D., Ichii, K., Marquet, P., Popp, A., Pörtner, H., Rogers, A., Scholes, R., Strassburg, B., Wu, J., & Ngo, H. (2021). How do we best synergize climate mitigation actions to co-benefit biodiversity?. *Global Change Biology*, 28, 2555 - 2577. <https://doi.org/10.1111/gcb.16056>.
- Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480), Article eaba1223.
<https://doi.org/10.1126/science.aba1223>
- Veldkamp, E., Schmidt, M., Powers, J., & Corre, M. (2020). Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 590 - 605. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0091-5>.
- Verma, A., Rout, P., Lee, E., Bhunia, P., Bae, J., Surampalli, R., Zhang, T., Tyagi, R., Lin, P., & Chen, Y. (2020). Biodiversity and Sustainability. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.1002/9781119434016.ch12>.
- Wan, Z., Zhao, C., Zhu, J., , X., Chen, J., & Wang, J. (2024). Assessment and Prediction of Coastal Ecological Resilience Based on the Pressure–State–Response (PSR) Model. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land13122130>.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Impacto ambiental

El impacto ambiental se define como el conjunto de actividades que desarrollan los seres humanos o fenómenos naturales, que generan alteraciones significativas al medio ambiente, tales como el riesgo a la sostenibilidad, explotación excesiva de recursos naturales e incluso la supervivencia humana. Dichas actividades pueden provenir de distintos sectores, como doméstico, industrial, agropecuario, urbano, comercial, catástrofes naturales, entre otras (Hernández et al., 2019; SEMARNAT, 2018).

2.1.1.1. Evaluación del Impacto Ambiental

El impacto ambiental es definido por la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) como: “la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza” (DOF, 2014).

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento administrativo con el fin de identificar si los impactos ambientales ejercidos en los ecosistemas generados por la ejecución de alguna actividad o proyecto se adaptan a los valores límites establecidos en las normativas nacionales, es finalizado con la resolución de una evaluación ambiental, lo que da una autorización y vigilancia de la acción (Parker et al., 2023).

Su importancia radica en la protección del medio ambiente, puesto que al identificar los impactos ejercidos, o que posiblemente se ejercen por actividades o proyectos ejecutables por el ser humano, se pueden implementar medidas preventivas o de mitigación, con el propósito de remediar o solventar los efectos negativos en el medio ambiente, además esto promueve el desarrollo sustentable del planeta (Loomis & Dziedzic, 2018).

Para iniciar una EIA es necesario conocer las causas de los impactos, según la actividad que se realice ya que no sólo es la pérdida de ecosistemas, sino los insumos utilizados para que se lleven a cabo las acciones y factores adicionales como emisiones por conectividad, producción, etc. (Gómez-Romero, 2013). Para presentar los resultados es importante mantener lógica y orden para que quienes se encarguen de revisarlo lo

puedan tener claro y no surjan problemas en el momento de tomar la decisión de aprobar o no la ejecución del proyecto o actividad.

2.1.1.2. Medidas preventivas, correctoras o mitigantes y compensatorias

Las medidas de prevención son aquellas que se deben ejecutar para prevenir o evitar los efectos que se prevé causarían daños al medio ambiente. Las medidas de mitigación o correctoras son un conjunto de acciones que el promovente del proyecto debe emplear para aminorar y restablecer o mediar el equilibrio y la condición en la que se encuentra el ecosistema previo a la perturbación que pueda causar el paso de actividades humanas (DOF, 2014). Y, las medidas compensatorias de impactos son irreversibles o inevitables, puesto que no se pueden omitir o aminorar, sino que se compensan (Dellavedova, 2011). Algunos ejemplos de estos métodos son: rehabilitación ecológica de áreas protegidas, uso de energías limpias, mantenimiento y renovación industrial, precaución ante catástrofes naturales en términos ingenieriles, pago por daños ambientales, etc. (Giraldez, 2011).

2.1.1.3. Indicadores para evaluar el impacto ambiental

Una vez que se identificaron los impactos o efectos de alguna actividad o proyecto sobre el medio ambiente, es necesario seleccionar índices o indicadores que permitan presentarlos en forma cualitativa o cuantitativa para ser evaluados. Un indicador es un parámetro o unidad que provee un valor de la magnitud del impacto y se representa numéricamente. Así mismo, un índice es un valor parcial de comparación que surge de la combinación de dos o más indicadores ambientales.

En el sector ambiental se han elaborado indicadores para entender, describir y analizar distintos fenómenos como el clima, erosión, peligro de especies vegetales y faunísticas, entre otras. Por medio de los indicadores se realizan evaluaciones periódicas del desempeño ambiental, así como identificar problemas ambientales (SEMARNAT, 2011).

Existen diversos modelos para agrupar los conjuntos de indicadores, uno de los más utilizados en México es el que desarrolló el analista canadiense Anthony Friend en 1970 y luego adoptado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE, 2024) y por Environment Canada, denominado modelo Presión-Estado-

Respuesta, con el fin de medir y reportar el estado en el que se encuentra el medio ambiente según sea distribución espacial deseada (SEMARNAT, 2011).

2.1.1.4. Metodología Presión-Estado-Respuesta (PER)

El modelo PER está basado las actividades del ser humano que ejercen alguna presión o presiones sobre el medio ambiente y cambian la calidad y cantidad de los recursos naturales existentes, haciendo referencia al estado actual del ecosistema. Así como la respuesta de la sociedad ante dichos cambios por medio de políticas ambientales, económicas y sectoriales (SEMARNAT, 2011; Vázquez-Valencia et al., 2018). Este esquema parte de cuestionamientos simples como: ¿Qué está afectando al ambiente?, ¿Qué está pasando con el estado del ambiente? y ¿Qué estamos haciendo acerca de estos temas? (SEMARNAT, 2011). Este enfoque permite evaluar de manera integral los efectos de las actividades humanas y las acciones para su mitigación (Álamos et al., 2024). La Figura 1 muestra el esquema del modelo PER y su clasificación.

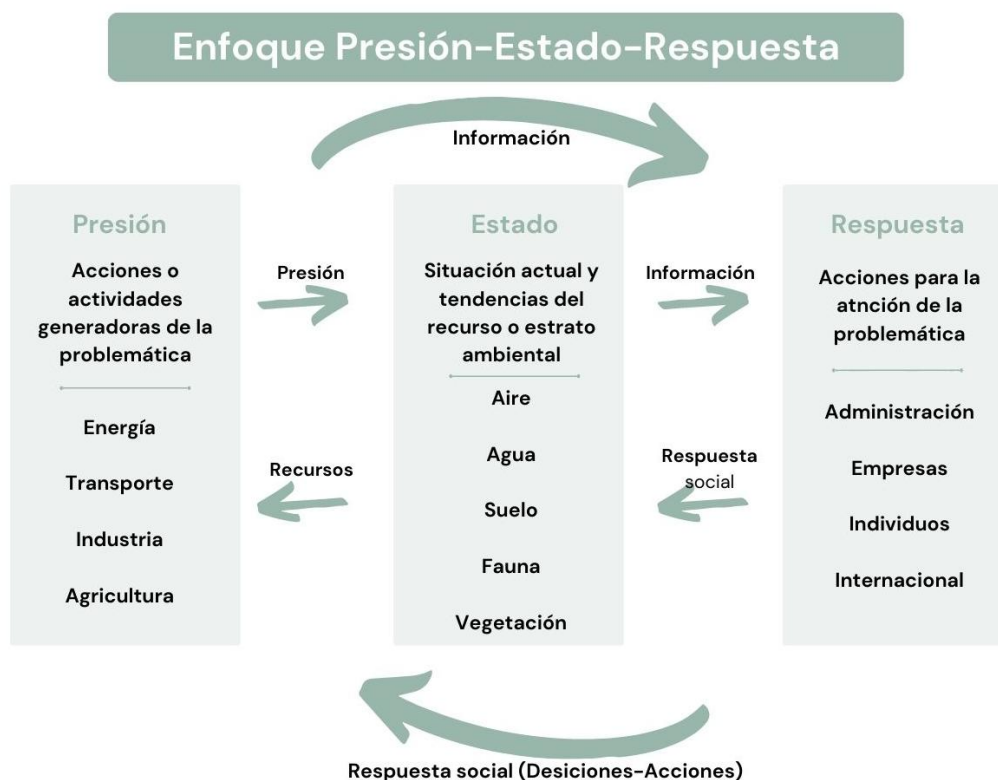


Figura 1. Modelo PER

Fuente: Elaboración propia según el esquema de la OCDE, 1993

Los indicadores de presión son aquellos que identifican y cuantifican las acciones humanas que se ejercen sobre el medio ambiente. Estos se dividen en dos categorías: presiones directas e indirectas. Las presiones directas consideran a los impactos ejercidos directamente sobre los ecosistemas como la contaminación, la deforestación o la extracción de recursos, el cambio de uso de suelo, consumo de plaguicidas en superficies agrícolas, etc. (SEMARNAT, 2021; Liu et al., 2022). Por otro lado, las presiones indirectas incluyen las actividades humanas que producen efectos adversos sin interactuar directamente con el ecosistema, con acciones como el crecimiento demográfico, el consumo energético, la producción industrial, la emisión de gases de efecto invernadero, entre otras (SEMARNAT, 2021; Barlow et al., 2018). Estos indicadores son muy importantes para diseñar políticas públicas orientadas a mitigar los impactos ambientales (OCDE, 2023).

Los indicadores de estado describen las condiciones actuales del ecosistema y sus recursos naturales en términos de cantidad, calidad, condición y disponibilidad. Deben estar diseñados para proporcionar información específica sobre la situación del ambiente y sus cambios en el tiempo, considerando efectos sobre la salud ecosistémica y humana. En México la SEMARNAT monitorea indicadores de estado como la calidad de agua en cuerpos de agua, disponibilidad de recursos, indicadores de biodiversidad (abundancia de especies), etcétera (SEMARNAT, 2021; Smith et al., 2021; Pereira et al., 2020). Estos indicadores son fundamentales como una base para evaluar el impacto de las acciones aplicadas y orientar políticas de protección al ambiente (UNEP, 2024).

Los indicadores respuesta manifiestan las medidas aplicadas por la sociedad y las autoridades para abordar la problemática ambiental. El objetivo de estas acciones es prevenir, reducir o mitigar la degradación del medio ambiente, así como conservar y proteger los ecosistemas y sus recursos naturales. Se han reportado indicadores ambientales de respuesta como la superficie incorporada a programas de pago por servicios ambientales, inversión en programas para conservación y rehabilitación de suelos, programas de restauración ecológica, inversión en energías renovables, reducción de emisiones de carbono, entre otros esfuerzos realizados (SEMARNAT, 2021; Strassburg et al., 2020). Dichas iniciativas están orientadas a la modificación de los

parámetros de presión o mejorar el estado de los ecosistemas, así como el apoyo a su conservación

2.1.1.5. Metodología Presión-Estado-Respuesta en recursos forestales

Como lo ha indicado la SEMARNAT, la implementación de programas para la conservación y rehabilitación de suelos, así como de programas de restauración ecológica, constituyen indicadores de respuesta que deben ser adoptados por la sociedad y autoridades para mitigar los impactos ambientales. En México la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha implementado el modelo PER en el sector forestal (Figura 2) con el objetivo de reducir la presión sobre los recursos forestales, promoviendo la recuperación de los bosques y su manejo sustentable. Estos esfuerzos incluyen acciones a favor de la sanidad mediante diagnósticos y tratamientos, como la inspección y vigilancia realizadas por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), que verifica el cumplimiento efectivo de la normatividad vigente. Además, considerando otras acciones aplicadas por las autoridades (SEMARNAT, 2012).



Figura 2. Esquema PER en sectores forestales en México

Fuente: Elaboración propia según SEMARNAT (2012)

2.1.2. Ecosistemas degradados, una manifestación de los impactos ambientales

Los ecosistemas degradados son aquellos que han sido impactados por cambios importantes y perjudiciales, afectando su funcionamiento, estructura o composición de especies causada por acciones antropogénicas o fenómenos naturales que pudieron ser controlados (Oraon et al., 2023). Dichos problemas ocasionan pérdida de servicios ecosistémicos lo que trae consigo reducción de la seguridad alimenticia, emisión de gases de efecto invernadero, contaminación de suelos y aguas, desequilibrio en ciclos regulatorios y cambio climático (Arneth, 2021).

Algunos ejemplos de actividades que ocasionan degradación ambiental son la deforestación, incendios forestales, crecimiento demográfico, agricultura intensiva, actividades mineras, contaminación antropogénica de suelos, agua y aire, ente otras. Por lo que se requieren técnicas que ayuden a contrarrestar o aminorar estas problemáticas (Oraon et al., 2023).

2.1.2.1. Alternativas para revertir el deterioro de los ecosistemas

Las técnicas de rehabilitación de un ecosistema son diversas y varían según el tipo de ecosistema, grado de degradación o las metas en términos del objetivo de rehabilitación. La ONU, 2021 establece las siguientes técnicas según el tipo de ecosistema (Cuadro 1):

Cuadro 1. Técnicas de rehabilitación de ecosistemas

Tipos de ecosistema	Actividades que causan degradación	Técnicas de rehabilitación
Tierras agrícolas	• Pérdida de fertilidad por uso excesivo • Erosión • Contaminación de suelos por plaguicidas y fertilizantes	• Disminución de labranza • Reducir uso de fertilizantes y de métodos de control de plagas químicos para sustituirlos por métodos biológicos • Diversificación de cultivos, incluyendo intercalar cultivos con frutales.
Bosques	• Tala • Obtención ilimitada de leña • Contaminación • Incendios forestales • Plagas • Deforestación	• Replantar y reducir presiones sobre los árboles para un desarrollo adecuado • Educación ambiental

Lagos y ríos		• Contaminación • Sobrepesca • Infraestructura • Extracción de agua para uso humano	• Reducir y tratar desechos • Gestionar demanda de agua y pesca • Promover la vegetación superficial
Pastizales y sabanas	y	• Cambio de uso de suelo, principalmente agrícola, ganadero y urbano	• Limpieza de vegetación leñosa • Siembra de pastos nativos • Reintroducción y protección para fauna
Montañas		• Cambio de uso de suelo para ganadería y agricultura • Erosión de suelos • Cambio climático	• Reforestación de bosques • Planificación de presas y carreteras para evitar fragmentación de ríos • Técnicas de agroslivicultura
Océanos y costas	y	• Contaminación • Cambio climático • sobreexplotación	• Normativas para pesca y cuidado de mangles • Tratamiento de aguas residuales • Gestión de vegetación marina
Urbana		• Desechos • Contaminación	• Promover vegetación para polinizadores • Creación de bosques urbanos • Promover aceras permeables y humedales urbanos para combatir inundaciones y contaminación • Rehabilitar áreas industriales con elementos de naturaleza para la recreación

Fuente: ONU, 2021

2.1.2.2. Restauración ecológica como mitigación al impacto ambiental

La restauración ecológica se define como el proceso de restituir o reconstruir ecosistemas que han sido alterados o destruidos, con el objetivo de recuperar su biodiversidad, funciones ecológicas y estructura. Es una herramienta fundamental para la conservación, ya que permite revertir procesos de degradación ambiental y promover la resiliencia de los ecosistemas frente a disturbios antrópicos o naturales. Este proceso busca restablecer la capacidad de los ecosistemas para sostener la vida y mantener o recuperar la provisión de servicios ambientales. Las medidas de restauración pueden incluir la rehabilitación de suelos, reintroducción de especies nativas y recuperación de procesos ecológicos clave, considerando los factores ambientales que pueden influir en el proceso (Groves et al., 2020).

2.1.2.3. Importancia de las micorrizas en la rehabilitación de un ecosistema

Como se mencionó en apartados anteriores, la degradación de los ecosistemas forestales ha sido creciente en los últimos años debido a las diversas actividades antropogénicas desmedidas que han causado la pérdida de riqueza, estructura y composición de dichos ecosistemas, afectando directamente los suelos con todas las consecuencias que esto puede llegar a tener. La biotecnología con ectomicorrizas crea un panorama diferente para la rehabilitación ecológica pues aporta mayor seguridad de que las especies arbustivas, producto de técnicas para la restauración, aumenten sus esperanzas de sobrevivir y tengan un desarrollo adecuado y resistencia ante fenómenos ajenos como plagas o fenómenos naturales e incluso contaminación de suelos, erosión y desertificación (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

Con el fin de promover el almacenamiento y captura de carbono, el uso de HEC se aplica en las reforestaciones y recuperación de ecosistemas forestales, ya que se ha observado que estas acciones promueven mayor facilidad en el establecimiento de árboles, aun en suelos degradados con deficiencias nutrimentales al incrementar la absorción de nutrientes. Las plantas inoculadas presentan un mayor crecimiento y desarrollo radical durante sus primeros años, incrementando la productividad primaria del ecosistema, lo que es un indicador de carbono orgánico transferido de la planta al suelo (Chávez-Aguilar et al., 2021).

En bosques templados a causa del deterioro en los ecosistemas o la erosión surge la necesidad de implementar medidas exitosas para su recuperación ecológica; estas acciones deben optimizar la cubierta vegetal, contribuir a la mejora de suelos degradados y deben ser sustentables. Los HEC desempeñan papeles muy importantes no sólo en el ecosistema general, sino particularmente en la salud del suelo pues tiene una relación simbiótica con las coníferas. Los hongos contribuyen a mejorar el ciclo de los nutrientes y la transferencia entre plantas mediante redes subterráneas micorrízicas, lo que mejora la productividad de los ecosistemas. Respecto a la relación simbiótica, se contribuye a que especies como las coníferas accedan a nutrientes esenciales y tengan mayor acceso al agua mientras se mejora la estructura del suelo. Al recibir estos beneficios, la planta

aumenta su supervivencia, lo que desempeña un papel importante en la rehabilitación de ecosistemas forestales (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

2.1.2.4. Interacción suelo-planta-microorganismos

La interacción suelo-planta-microorganismos desempeña un papel fundamental en el desarrollo de especies vegetales, debido a que influye directamente en el crecimiento de las plantas. Es en la rizosfera donde se concentran los microorganismos funcionales, como solubilizadores de fosfatos, fijadores de nitrógeno y agentes de control biológico, la competencia por espacio y nutrientes esenciales que provienen del suelo. Los hongos micorrízicos, siendo parte de los microorganismos rizosféricos traen consigo significativos efectos sinérgicos, mejorando el desarrollo y crecimiento de las plantas (Cano, 2011).

Estas interacciones no sólo contribuyen a la productividad de las plantas, sino que también favorecen la sostenibilidad ambiental, por lo que tienen un gran impacto en sectores agrícolas, silvícolas y medioambientales (Trávez et al., 2024).

2.1.2.5. Análisis de fertilidad del suelo según los lineamientos oficiales en México

El análisis de fertilidad del suelo es fundamental para cuantificar sus propiedades químicas, físicas y biológicas, así como para implementar un manejo sostenible de nutrientes. En México se realiza conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, donde se establecen las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos; además se estipulan lineamientos para muestreos y análisis realizados en campo y laboratorio (Pérez et al., 2023).

La NOM-021-RECNAT-2000 define a la fertilidad como la cualidad del suelo que permite proporcionar los compuestos correctos, en cantidades adecuadas y en correcto balance para el crecimiento de las plantas mientras otros factores como disponibilidad de luz, temperatura óptima y condiciones físicas del suelo, son propicios (SEMARNAT, 2002).

El procedimiento estipulado en la NOM para el análisis de fertilidad inicia con el muestreo en campo bajo ciertas especificaciones, continuando con la preparación de la muestra para las pruebas y la realización de las pruebas. Las principales determinaciones analíticas para la evaluación de fertilidad consideradas son: pH (medido en agua), densidad aparente, contenido de materia orgánica, nitrógeno inorgánico, determinación

de textura, fósforo extraíble en suelos neutros a alcalinos y fosforo extraíble en suelos ácidos a neutro, capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio) (SEMARNAT, 2002).

2.1.3. Simbiosis micorrízica, una práctica de la restauración ecológica

La palabra micorriza proviene del griego myces, hongo y rhiza, raíz, lo que representa la unión entre factores micobiontes (hongos) y fitobiontes (raíces de los árboles) y fue determinada en 1885 por Albert Bernhard Frank debido a sus investigaciones en la simbiosis de plantas con algunos hongos. Estas interacciones de raíces con diversos microorganismos, particularmente hongos, están colectivamente en la rizosfera. Específicamente en la relación con la colonización de hongos micorrízicos la planta aumenta las probabilidades de tener acceso a agua y más nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, mientras la plantas, gracias a la fotosíntesis que realizan, proveen de carbohidratos a los hongos. Este intercambio de nutrientes es esencial en los procesos del suelo, el ciclo del carbono y la salud de los ecosistemas, lo que es un claro ejemplo de una simbiosis mutualista benéfica, ya que reciben un beneficio mutuo ayudándose a coexistir dentro de los ecosistemas forestales (Shi et al., 2023). No sólo el transporte de nutrientes y facilitar el trasporte del agua son las funciones esenciales de las micorrizas en las plantas, sino que también les ayudan protegerlos contra patógenos y reducen la pérdida de sedimentos generado cambios en la agregación del suelo debido a la extensión del micelio (Alem et al., 2020).

Debido a que las raíces de las plantas hospederas durante su desarrollo constantemente se enfrentan a la exposición de estrés biótico y abiótico, principalmente a agentes patógenos, es de gran utilidad contar con un elemento que le dé soporte y mejore su resistencia ante este tipo de problemáticas, es así como los hongos micorrízicos juegan un papel fundamental para brindar este soporte. Las micorrizas, son aproximadamente 500 especies y más del 90% son vasculares. Se conoce que la simbiosis micorrízica se encuentra en todos los ecosistemas terrestres (Pérez-Moreno et al., 2004).

2.1.3.1. Tipos de micorrizas

La clasificación actual de la simbiosis micorrízica fue propuesta por Harley y Smith en 1983 y posteriormente la revalidaron Smith y Read en 1997. Los tipos de asociaciones

micorrízicas varían según las características de las plantas hospedantes y de los hongos con los que interactúan. Los tipos más comunes de micorrizas son las arbusculares y las ectomicorrizas. Sin embargo, también existen otros tipos como las orquideoide, ericoide, monotropoide, ectendomicorrizas y arbutoide (Corrales-Ramírez et al., 2017).

La clasificación de estas asociaciones está basada principalmente en la relación con tipos de vegetación y en la morfología de las estructuras. Las raíces micorrizadas experimentan cambios morfológicos que las hacen distintas, lo que ayuda a identificar las raíces micorrizadas. Las modificaciones constan de la formación de raíces ahorquilladas, no ahorquilladas, bifurcas, nodulares, multihorquilladas o coraloides. Estas características son de gran utilidad para identificar presencia y tipos de asociación. En la Figura 3 se observa un diagrama donde se muestran los distintos tipos de micorrizas (Agarwal & Sah, 2009; Jha & Songachan, 2023).

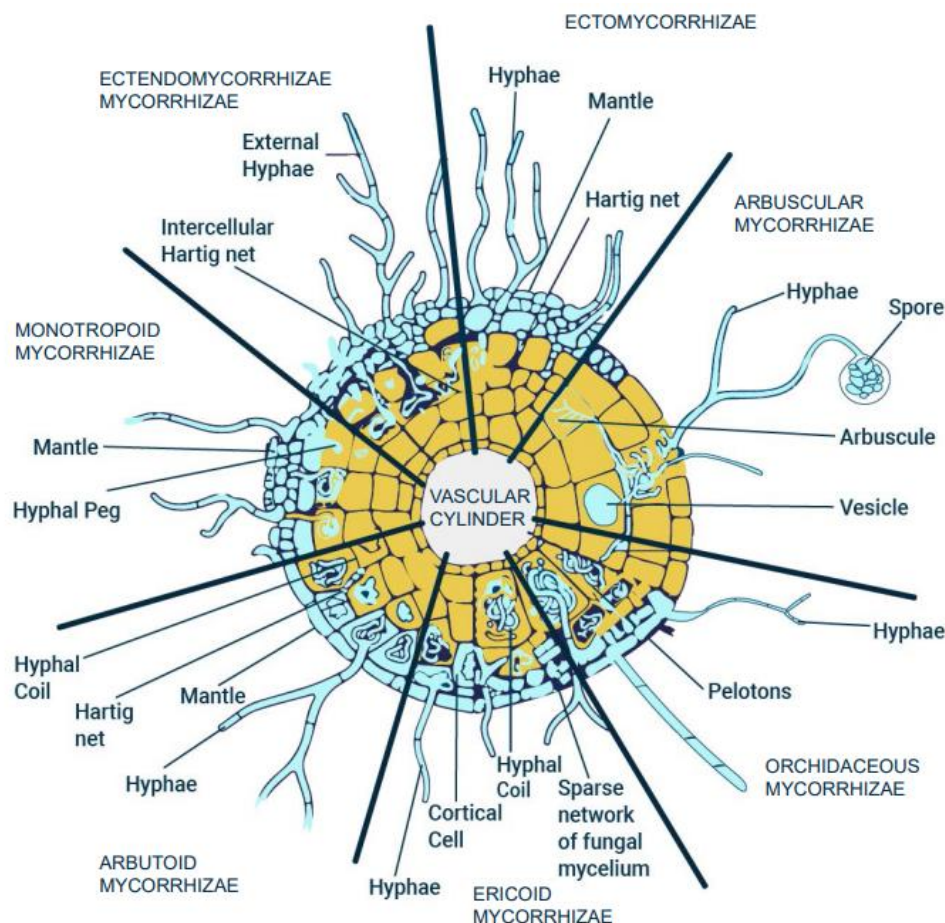


Figura 3. Tipos de micorrizas.

Fuente: Jha & Songachan (2023).

2.1.3.2. Ectomicorrizas

Las ectomicorrizas son asociaciones simbióticas mutualistas entre las raíces de aproximadamente el 2% de las plantas vasculares, principalmente árboles de bosques templados y boreales (incluyendo familias como Pinaceae, Fagaceae, Dipterocarpaceae y Myrtaceae), y hongos de los filos Ascomycota y Basidiomycota (Liu et al., 2020; Soto-Gil et al., 2022; Ryberg et al., 2022). A nivel mundial, se estima que existen alrededor de 7,750 especies de hongos ectomicorrízicos, aunque diversas estimaciones sugieren que la riqueza se extiende entre 20,000 y 25,000 especies, distribuidas en más de 250 géneros (Liu et al., 2020).

En esta interacción simbiótica, la raíz es envuelta por el hongo sin que las hifas penetren las células epidérmicas, formando las estructuras características que facilitan el intercambio bidireccional de agua y nutrientes ente ambos organismos (Liu et al., 2020; Carrillo-Saucedo et al., 2022; Ryberg et al., 2022). Una de las estructuras es el manto fúngico, el cual está conformado por una capa densa de hifas que rodea completamente la raíz del árbol, actuando como barrera protectora y facilitando la absorción de nutrientes del suelo circundante (Liu et al., 2020; Ryberg et al., 2022). La siguiente es la red de Hartig, que como indica su nombre, consiste en una red intrincada de hifas que se introduce en las células corticales de la raíz, permaneciendo específicamente en el espacio intercelular sin invadir el interior de las células vegetales. Esta estructura es la que representa la principal interfaz simbiótica responsable del intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta (Ryberg et al., 2022; Mello & Balestrini 2018). Finalmente, el micelio extraradical, también formado por extensas redes de hifas que se extienden desde el manto hacia el suelo adyacente, conectando múltiples plantas hospederas, aumentando significativamente la superficie de absorción de agua y nutrientes para el árbol y facilitando el intercambio de recursos ente las plantas (Ryberg et al., 2022).

La simbiosis ectomicorrízica cumple funciones ecosistémicas esenciales que trascienden la absorción de nutrientes, colocando a los HEC como un elemento clave en la resiliencia de los ecosistemas forestales frente a fenómenos derivados del cambio ambiental (Song, 2024). Como se muestra en la Figura 4, los HEC participan activamente en el ciclo de nutrientes, colaborando con la descomposición de materia orgánica mediante

mecanismos enzimáticos y no enzimáticos, en la movilización y transporte de fósforo a través de transportadores específicos y enzimas, así como en la aceleración de la meteorización de rocas y minerales mediante procesos físicos y químicos (Liu et al., 2020). Asimismo, las redes miceliares formadas por los HEC favorecen el transporte de agua entre los árboles, lo que asegura el suministro hídrico en las plantas hospedadoras y contribuye a mitigar el estrés por sequía. Estas interacciones también promueven la biodiversidad microbiana, la estabilidad del suelo y brindan protección contra patógenos (Soto-Gil et al., 2022; Ryberg et al., 2022)

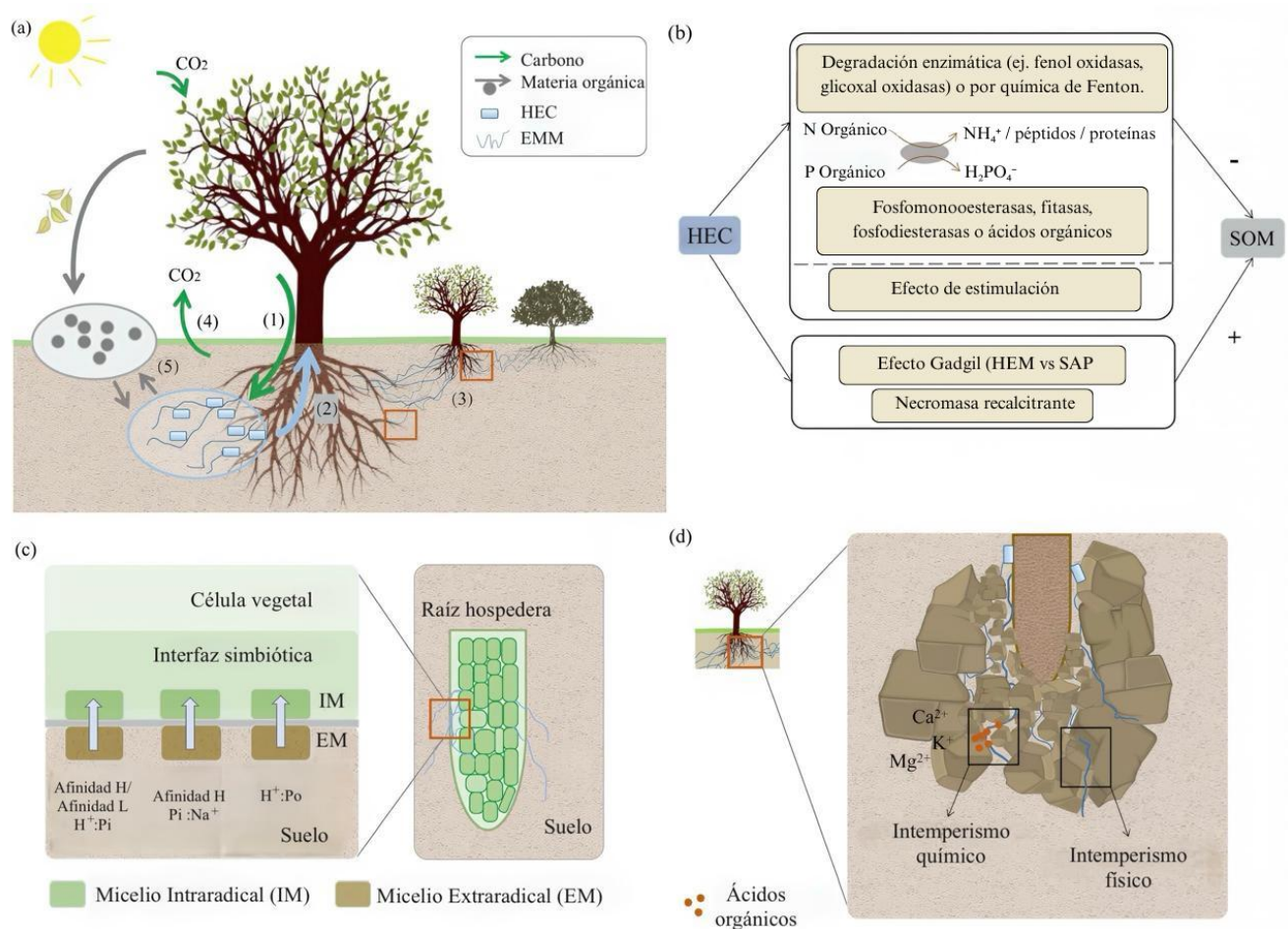


Figura 4. Función de las ectomicorrizas

Donde (a) representa el flujo del Carbono desde la planta hacia los HEC, estimulando la descomposición de la materia orgánica del suelo y el reciclaje de nutrientes. Los árboles transfieren compuestos fotosintéticos, principalmente azúcares a los HEC, los cuales aumentan la superficie de absorción de las raíces, contribuyendo en la captación de agua,

nutrientes y otros recursos del suelo. Las hifas forman redes miceliales intra e interespecíficas que permiten un intercambio bidireccional de carbohidratos y nutrientes. Esta interacción entre la raíz y el hongo participan también en la liberación de dióxido de carbono (CO₂) mediante la respiración del suelo. Además, la renovación del micelio y de las raíces finas conforma una importante fuente de carbono lábil y nutrientes que favorecen la actividad microbiana, integrándose como necromasa a la materia orgánica mediante sustrato. (b) Los HEC intervienen en la descomposición de la materia orgánica mediante la acción enzimática, la química de Fenton (reacción no enzimática en la que el peróxido de hidrogeno oxida el Fe²⁺, ocasionado radicales de hidroxilo), así como a través del efecto de estimulación o *priming*, generado por exudados radicales y micorrízicos que también incrementan la actividad microbiana. Por otro lado, puede manifestarse el efecto *Gadgil*, en el cual la competencia entre hongos micorrízicos y saprótrofos (SAP) reduce la descomposición de la materia orgánica del suelo. (c) Los HEC transportan fósforo (P) desde el suelo hasta la raíz en la interacción simbiótica, mediante transportadores específicos de fosfato, tanto del alta y baja afinidad, facilitando la absorción de este nutriente esencial. (d) Los HEC aceleran la meteorización de rocas y minerales a través de procesos físicos y químicos, lo que contribuye a la liberación de nutrientes esenciales como fósforo, potasio y nitrógeno.

Fuente: Liu et al., 2020, traducción de autoría propia

2.1.3.4. Caracterización morfoanatómica de ectomicorizas

Debido a la gran diversidad, complejidad e importancia ecológica de la simbiosis mutualista entre HEC y especies forestales, se hace fundamental su caracterización morfológica y anatómica. Esto debido a que la interacción es fundamental para el establecimiento y buen funcionamiento de los bosques templados, ya que los HEC además de facilitar la absorción de agua y nutrientes, también forman propágulos en el suelo, mismos que están compuestos por estructuras como esporas e hifas. Dichos bancos actúan como la fuente principal de inóculo posterior a disturbios en los ecosistemas, contribuyendo con su regeneración y resiliencia (Garibay-Orijel et al., 2013).

A nivel morfoanatómico, las raíces con ectomicorizas presentan modificaciones, como la inhibición de la formación de pelos radicales, hiperplasia cortical y mayor ramificación, lo que optimiza la eficiencia de esta simbiosis (Ortega, 2024). Así mismo, se ha

identificado que el desarrollo de estas estructuras implica un diseño dinámico en las paredes celulares de la planta y del hongo, regulado por la formación de la red de Hartig y el manto (Agerer, 2024).

La caracterización morfoanatómica consiste en la identificación y descripción detallada de estructuras internas y externas de las estructuras que se forman en la asociación. El método para realizar este análisis se realiza conforme los criterios establecidos en sistemas de clasificación como el desarrollado por DEEMY (Soto-Gil et al., 2022). Las características morfoanatómicas más relevantes estudiadas de las estructuras son tipo de ramificación, color del manto, forma, textura, presencia de rizomorfos, abundancia del manto externo, morfología y tipo de manto (Garibay-Orijel et al., 2013; Soto-Gil et al., 2022).

Este proceso aporta grandes contribuciones a estudios ecológicos, permitiendo clasificar y analizar las diversas especies fúngicas, partiendo de sus características y estructuras específicas (Salgado-Salomón et al., 2017). Además, realizar estudios de esta índole tiene un impacto funcional al facilitar la producción de inoculantes micorrízicos, aportando herramientas de gran utilidad en el manejo sustentable y la conservación de ecosistemas forestales (Chávez-Aguilar et al., 2021).

2.1.3.5. Los hongos ectomicorrízicos en ecosistemas forestales

La biodiversidad de los HEC en los ecosistemas forestales es muy alta, específicamente en bosques templados y boreales. Lo que es fundamental para su salud y buen funcionamiento, debido a la simbiosis que forma con las raíces de los árboles, principalmente como *Pinus*, *Quercus* y *Fagus* (Garibay-Orijel et al., 2013). Sin embargo, las comunidades de HEC se deriva de ciertas condiciones como las condiciones climáticas, el tipo de suelo, manejo y estructura del bosque.

Particularmente, la simbiosis ectomicorrícica con el género *Pinus*, a pesar de su importancia en ecosistemas boscosos han sido escasamente estudiados. Con el objetivo de mejorar la gestión y restauración de los bosques es esencial conocer mejor estas relaciones para mejorar la gestión y restauración de ecosistemas forestales, donde *Pinus* tiene un papel muy amplio (Carrasco-Hernández et al., 2010).

En el uso de HEC surge la necesidad de emplear mayormente hongos nativos asociados a especies locales ya que siendo así las especies se adaptarán con más facilidad a las condiciones ambientales. Esto garantiza beneficios además de ecológicos, económicos y culturales, dado a que estos hongos son un producto forestal no maderable con posibilidades de dar un valor agregado a la recuperación de sitios forestales degradados.

2.1.4. Descripción de las especies de estudio

2.1.4.1. *Pinus greggii* Engelm.

Pinus greggii Engelm., conocido como pino de Gregg o pino prieto, es una especie de pino endémica de México que ha sido ampliamente estudiada. Esta conífera perennifolia alcanza alturas de entre 10 y 25 metros. Presenta corteza lisa y grisácea en su juventud, volviéndose áspera en la madurez (Ortiz-Mendoza et al., 2021). Sus acículas, son de una tonalidad verde claro, agrupadas en fascículos de tres, miden de 7 a 14 cm de largo, poseen bordes acerrados y diversos canales resiníferos. Sus conos son ovoides o cilíndrico-cónicos, de 8 a 15 cm de longitud, con escamas delgadas y flexibles. Las semillas son subcilíndricas, de color negruzco, miden entre 6 y 10 mm de ancho y presentan un ala bien desarrollada (Farjon, 2023)

La distribución natural de *P. greggii* está restringida principalmente a la Sierra Madre Oriental, abarcando los estados de Coahuila y Nuevo León, así como la región centro de México, incluyendo Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, entre otros. Actualmente, se estima que su distribución en el país cubre aproximadamente 617,706 hectáreas. Algunos modelos de distribución estiman una disminución significativa del hábitat adecuado bajo escenarios futuros de cambio climático, con pérdidas de hasta el 21.8% del área actual (Martínez-Sifuentes et al., 2020).

Su principal hábitat se encuentra en ecosistemas de montaña, donde las variables climáticas y altitudinales definen su rango natural. Esta especie prospera en zonas con temperaturas medias anuales entre 13 y 17°C, siendo más cálidas en el sur que en el norte de su distribución. Puede tolerar heladas esporádicas, particularmente en los límites superiores de su rango altitudinal, que va de los 1,300 a los 2,700 metros sobre el nivel del mar. Respecto a su precipitación, habita regiones con un promedio anual de 600 a 800 mm, aunque también se desarrolla en sitios con registros de entre 100 y 1600 mm

sin que limite significativamente su crecimiento (Martínez et al., 2020; Martínez-Sifuentes et al., 2020).

Adicionalmente, su asociación con hongos ectomicorrízicos contribuye en la formación de comunidades forestales adaptables a condiciones de aridez, fortaleciendo la biodiversidad de estos ecosistemas, aunque aun no se conoce con exactitud cuantas especies fúngicas participan en esta simbiosis (Valdés et al., 2020). Así mismo, se ha identificado su susceptibilidad a patógenos como *Fusarium circinatum*, lo que resalta su relevancia como modelo de investigación en mecanismos de resistencia y estrategias de manejo forestal sostenible (Visser et al., 2023).

La importancia de *P.greggii* radica en su valor económico y social, derivado de la producción de madera y de los servicios ambientales que provee, tales como la regulación hídrica, provisión de hábitats, conservación de suelos y mantenimiento de la biodiversidad. Se reconoce por su capacidad de adaptación a suelos degradados, resistencia a sequías, crecimiento acelerado bajo condiciones ambientales limitantes y fructificación temprana. Sin embargo, su desarrollo sigue restringido por ciertos factores ecológicos, lo que la hace vulnerable a cambios en el entorno (Martínez et al., 2020; Martínez-Sifuentes et al., 2020; Valdés et al., 2020).

Debido a su limitada distribución y a las amenazas asociadas al cambio climático, se han establecido zonas prioritarias para su conservación y restauración *in situ*, especialmente en las áreas donde se conoce puede tener mayor supervivencia como el noreste y centro de México (Martínez et al., 2020; Martínez-Sifuentes et al., 2020).

2.1.4.2. *Pinus oocarpa* Schiede

Pinus oocarpa es una conífera perenne que alcanza entre 20 y 35 metros de altura. Presenta un tronco recto y cilíndrico, con corteza es escamosa de tonalidad rojiza en ejemplares jóvenes, la cual se torna grisácea y fisurada longitudinales en árboles maduros. Las hojas están dispuestas en fascículos de 3 a 5 acículas, son rígidas, de color verde-amarillento y miden entre 17 y 30 cm de longitud. Los conos son ovoides o subglobosos, con una longitud de 3 a 10 cm (Farjon, 2023).

Se distribuye naturalmente en bosques subtropicales de México, con presencia destacada en la depresión central de Chiapas, la Sierra Madre de Chiapas, los Altos Centrales y diversas montañas orientales del país. Su densidad poblacional varía según las condiciones locales (Garnica & Cárdenas, 2019). Asimismo, se ha introducido y naturalizado en otras regiones, como el Cerrado brasileño, donde se ha observado un comportamiento invasivo con tasas de expansión de hasta 12.72 metros por año y densidades de hasta 1,212 individuos por hectárea (Braga et al., 2014).

Su hábitat natural comprende bosques subtropicales y zonas de montaña, en los que predominan temperaturas medias anuales entre 18 y 24°C. Se desarrolla en altitudes que varían entre los 1,100 y 1,500 msnm. Las precipitaciones anuales en las zonas donde prospera oscilan entre los 800 y 1,800 mm. Su distribución y éxito de supervivencia están fuertemente influenciados por factores climáticos como la precipitación y temperatura, así como la disponibilidad de agua y profundidad del suelo. Forma densas poblaciones y existe una amplia variabilidad genética influenciada por gradientes altitudinales, lo cual le permite adaptarse exitosamente a distintas condiciones, incluido el cambio climático (Sáenz-Romero et al., 2006; Garnica & Cárdenas, 2019).

En cuanto a investigaciones sobre simbiosis micorrízica, *P. oocarpa*, al igual que otras especies del género *Pinus*, establece relaciones ectomicorrízicas que son esenciales para completar su ciclo vital. Gbadegesin (1990) documentó que la inoculación con especies como *Rhizopogon* y *Pisolithus tinctorius* mejoran significativamente su crecimiento y supervivencia, particularmente en suelos con condiciones pobres o bajo condiciones ambientales restrictivas.

La importancia de *P. oocarpa* recae en su alta adaptabilidad y amplia variabilidad genética, lo cual le permite formar poblaciones densas y resilientes en diversos gradientes altitudinales. Estas características lo consolidan como un recurso clave en programas de restauración ecológica, *conservación de germoplasma y mitigación de los efectos del cambio climático* (Sáenz-Romero et al., 2006).

2.1.4.3. *Pinus maximartinezii* Rzedowski

Pinus maximartinezii Rzedowski, también conocido como pino azul o maxipiñon, es una especie de pino piñonero que alcanza entre 6 y 15 metros de altura. Como conífera,

presenta acículas agrupadas en fascículos de cinco, conos ovoides y grandes, y piñones de considerable tamaño, los cuales son comestibles y de alto valor comercial. Un rasgo distintivo es la presencia prolongada de hojas primarias, lo que representa un caso de heterocronía paedomórfica, posiblemente como una adaptación a diversos ambientes (González-Elizondo et al., 2011).

Se trata de una especie rara y endémica de México, con distribución extremadamente restringida. Hasta ahora se reconocen solo dos poblaciones naturales: una ubicada en el Cerro de Piñones, municipio de Juchipila, en la Sierra de Morones, Zacatecas, con una extensión estimada entre 400 y 925 has; y la otra en el municipio del Mezquital, Durango, con una superficie aproximada de 110 has. Ambas se sitúan entre 1,500 y 2,260 msnm, laderas escarpadas y cañadas de la Sierra Madre Occidental (González-Elizondo et al., 2011; Sanchez-González, 2016).

El hábitat de *P. maximartinezzi* se caracteriza por un clima templado, con temperaturas medias anuales entre 17 y 20°C. Crece en altitudes que oscilan entre 1,500 y 2,260 msnm, en terrenos con pendientes pronunciadas de 25 a 80%, con exposición al oeste, norte y sur principalmente. El sustrato es principalmente compuesto por regosoles y litosoles desarrollados sobre roca ígnea, adaptándose a suelos delgados y pedregosos (López & CONABIO, 2025).

Esta especie endémica está catalogada en peligro de extinción debido a su limitada distribución geográfica y a presiones como la erosión, incendios forestales, sobrepastoreo y pérdida de hábitat (López & CONABIO, 2025; Universidad de Guanajuato, 2021). En el aspecto económico, sus piñones son consumidas localmente y exportadas a países como Japón y Estados Unidos, ya que son una fuente alimenticia y de ingresos. Se conoce que puede soportar cosechas intensas sin afectar su estabilidad poblacional, sin embargo, la deforestación y destrucción de su hábitat presentan una severa amenaza (López & CONABIO, 2025).

2.1.4.4. *Suillus kaibabensis* Thiers

El género *Suillus*, pertenece a la familia Suillaceae, agrupa a numerosas especies de hongos ectomicorrízicos que establecen asociaciones simbióticas principalmente con coníferas de la familia Pinaceae. Los basidiomas de estas especies presentan formas y

colores diversos, con desarrollo epigeo generalmente, sin embargo, en caso excepcionales como *Suillus hypogaeus*, pueden ser hipogeos, la primera trufa descrita dentro del género (Palamarchuk et al., 2021; Páez et al., 2024).

S. kaibabensis ha sido reportado en regiones templadas de México, estrechamente asociado a especies como *Pinus greggii*, lo que condiciona su distribución a la presencia de su hospedero (Cardoso, 2023). Este hongo habita en suelos volcánicos poco desarrollados y constantemente degradados, como tepetates. Puede encontrarse tanto en ecosistemas forestales naturales como en plantaciones y jardines donde se han introducido especies de pino (Szczepkowski & Olenderek, 2017; Cardoso, 2023).

La altitud donde se desarrolla oscila entre los 2,400 y 3,000 msnm, con temperaturas medias anuales entre los 10 y 16°C y precipitaciones anuales que van de 800 a 1,200 mm (Kuo, 2020).

Las especies del género *Suillus* son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas forestales, formando ectomicorrizas que mejoran significativamente la absorción de agua y nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, a través del manto micelial y la red de Hartig. Lo que promueve el desarrollo de las coníferas en suelos pobres y erosionados (Grobys et al., 2020; Cardoso 2023).

Además, *S. kaibabensis* y otras especies del género representan un destacable valor económico y social por su carácter comestible. Su alto contenido nutrimental y propiedades antioxidantes le aportan un potencial en la seguridad alimentaria local como en la valorización de productos no maderables (Grobys et al., 2020; Cardoso-Villanueva et al., 2023; Szczepkowski & Olenderek, 2017).

2.1.4.5. *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke

Laccaria laccata (Scop.) Cooke es un hongo basidiomiceto ectomicorrízico comestible que presenta un sombrero de color marrón a rojizo con forma de sombrilla, láminas espaciadas y estípite delgado. Esta especie se distingue por su alta variabilidad morfológica, incluyendo diferencias en el tamaño y forma de las esporas y en la tonalidad del sombrero (Aguirre et al., 2021; Jha & Thapa 2025).

Se encuentra extensamente distribuido en las regiones templadas del hemisferio norte y zonas montañosas de América Latina. En México, se ha documentado en los bosques templados mixtos y de pino, como en San Pedro Nexapa, Estado de México (Aguirre et al., 2021).

Su hábitat son principalmente suelos de bosques templados, especialmente aquellos dominados por coníferas del género *Pinus*. Prefiere suelos ácidos o neutros, con buena capacidad de adaptación a suelos degradados, disturbados o de origen volcánico, lo que incrementa su importancia en procesos de restauración ecológica (Aguirre et al., 2021; Jha & Thapa 2025).

Estudios recientes resaltan la relevancia ecológica de su simbiosis ectomicorrízica, especialmente con *Pinus greggii*. Esta interacción contribuye significativamente en la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, aumenta la biomasa vegetal y promueve una mayor actividad microbiana en la rizosfera. También se ha observado un incremento en la abundancia de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfatos (Aguirre et al., 2021).

Además de su valor ecológico, es un hongo silvestre ampliamente reconocido como comestible en diversas regiones del mundo. Su consumo se debe a su valor nutricional como su disponibilidad en bosques de pinos y encinos. Cuenta con un alto contenido de carbohidratos y proteínas, reducido en grasas y con cantidades considerables de fibra y cenizas, lo que lo hace valioso en favor de la soberanía alimenticia mundial (Jha & Thapa, 2025).

2.1.4.6. *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Qué.

La mayoría de las especies del género *Hebeloma* son hongos ectomicorrízicos. *Hebeloma mesophaeum* es un basidiomiceto que desarrolla un micelio extraradical capaz de formar redes en el suelo (Aguilar et al., 2021). Presenta cuerpos fructíferos de tamaño medio, láminas de color marrón a pardo y esporas ornamentadas (Eberhardt et al., 2022).

Tiene una distribución cosmopolita, extendiéndose a lo largo de bosques templados y boreales de Europa, América del Norte, así como las regiones árticas y alpinas. Su presencia ha sido documentada incluso en Groelandia (Eberhardt et al., 2021).

Habita en bosques de coníferas y mixtos, así como ambientes de tundra y de alta montaña, donde forma asociaciones ectomicorrízicas con especies vegetales del género *Pinus* (Eberhardt et al., 2021; Aguilar et al., 2021).

Se ha demostrado que *H. mesophaeum* mejora significativamente el crecimiento de *Pinus greggii* en condiciones de invernadero, lo que sugiere una adaptación a ciertos tipos de suelo específicos y condiciones particulares de humedad (Aguilar et al., 2021, Martínez-Reyes et al., 2012). Esta especie presenta tasas de micorrización elevadas (hasta un 79.5%), lo que facilita una mayor translocación de nutrientes, particularmente fósforo y magnesio, hacia las plantas hospedantes. Además, su micelio forma un nicho trófico para la mesofauna del suelo (ácaros y colémbolos), contribuyendo con la diversidad y estructura de la biota edáfica (Aguilar et al., 2021; Becquer et al., 2018).

Finalmente, se conoce que en diversas regiones del mundo se considera toxico, sin embargo, en México es valorado por su aporte nutricional como por su papel en la silvicultura. Es una de las especies mas comercializadas y consumida, debido a su contenido proteico, cantidad de humedad, cenizas fibra (León et al., 2018; Montoya et al., 2014).

2.4. Literatura citada

- Agarwal, P., & Sah, P. (2009). Ecological importance of ectomycorrhizae in world forest ecosystems. *Nature and Science*, 7(2), 107–116. http://www.sciencepub.net/nature/ns0702/13_1557_Ectomycorrhizae_ns0702_107_116.pdf
- Agerer, R. (2024). Fungal relationships and structural identity of their ectomycorrhizae. *Mycorrhiza*, 34(5), 421–437. <https://doi.org/10.1007/s00572-024-01174-9>
- Aguilar, I., Martínez-Reyes, M., Pérez-Moreno, J., & Valdez-Carrasco, J. (2021). Ensamblajes de mesofauna en el micelio extraradical de raíces de *Pinus greggii* con tres hongos ectomicorrízicos., 52. <https://doi.org/10.33885/SF.2021.52.1382> .
- Aguirre-Zamora, M., Pérez-Moreno, J., López-Lozano, N. E., Barragán-Soriano, J. L., & Delgadillo-Martínez, J. (2021). La inoculación de *Pinus greggii* con el hongo ectomicorrízico *Laccaria laccata* favorece a las comunidades nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Biotechnia*, 23(2), 5–10. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1302>
- Álamos, N., Barría, P., Siegmund, A., Arumí, J. L., Figueroa, R., & Urrutia, R. (2024). The influence of human activities on streamflow reductions during the megadrought in

- central Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(11), 2483–2503. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2483-2024>
- Alem, D., Dejene, T., Oria-de-Rueda, J. A., Geml, J., & Martín-Pinto, P. (2020). Soil fungal communities under *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. plantation forests of different ages in Ethiopia. *Forests*, 11(10), Article 1109. <https://doi.org/10.3390/f11101109>
- Arneth, A., Olsson, L., Cowie, A., Erb, K.-H., Hurlbert, M., Kurz, W. A., Mirzabaev, A., & Rounsevell, M. D. A. (2021). Restoring degraded lands. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 569–599. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-054809>
- Barlow, J., França, F., Gardner, T. A., Hicks, C. C., Lennox, G. D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E. P., Ferreira, J., Guénard, B., Leal, C. G., Isaac, V., Lees, A. C., Martinelli, L. A., Mongabay, C., Moura, N. G., Oliveira, V. H. F., Pardini, R., Quesada, C. A., ... Graham, N. A. J. (2018). The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature*, 559(7715), 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>
- Becquer, A., Garcia, K., Garcia, K., Amenc, L., Rivard, C., Rivard, C., Doré, J., Trives-Segura, C., Szponarski, W., Russet, S., Baeza, Y., Lassalle-Kaiser, B., Zimmermann, S., & Plassard, C. (2018). The Hebeloma cylindrosporum HcPT2 Pi transporter plays a key role in ectomycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 220(4), 1185–1199. <https://doi.org/10.1111/NPH.15281>
- Braga, E., Zenni, R., & Hay, J. (2014). A new invasive species in South America: *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.. *BioInvasions Records*, 3, 207–211. <https://doi.org/10.3391/BIR.2014.3.3.12>
- Cano, M. A. (2011). Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(2), 15–31. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262011000200003
- Cardoso Villanueva, M. R. (2023). Cultivo del hongo comestible *Suillus kaibabensis* Thiers asociado a *Pinus greggii* Engelm. [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Instituto COLPOS.
- Carrasco-Hernández, V., Pérez-Moreno, J., Espinosa-Hernández, V., Almaraz-Suárez, J. J., Quintero-Lizaola, R., & Torres-Aquino, M. (2010). Caracterización de micorrizas establecidas entre dos hongos comestibles silvestres y pinos nativos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(4), 567–577. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000400009

- Carrillo-Saucedo, Dolphin, 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), Article e1932. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Chávez-Aguilar, G., Pérez-Suárez, M., & Burrola-Aguilar, C. (2021). Ectomicorrizas, su papel potencial en la mitigación del cambio climático. *Revista Ciencia UANL*, 24(106), 25–32. <http://cienciauanl.uanl.mx/wp-content/uploads/2021/04/106-ectomicorrizas.pdf>
- Chazdon, R. L., & Uriarte, M. (2019). Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration. *Biotropica*, 51(3), 305–315. <https://doi.org/10.1111/btp.12685>
- Corrales-Ramírez, L. C., Caycedo-Lozano, L., Gómez-Méndez, M. A., Ramos-Rojas, S. J., & Rodríguez-Torres, J. N. (2017). *Bacillus* spp.: Una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova*, 15(27), 46–65. <https://doi.org/10.22490/24629448.1958>
- Dellavedova, M. (2011). *Guía metodológica para la elaboración de una EIA* [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/3543>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2014). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5366147&fecha=31/10/2014
- Eberhardt, U., Beker, H., Borgen, T., Knudsen, H., Schütz, N. y Elborne, S. (2021). Un estudio de Hebeloma (Hymenogastraceae) en Groenlandia. *MycKeys*, 79, 17 - 118. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.79.63363>
- Eberhardt, U., Schütz, N., Bartlett, P. y Beker, H. (2022). 96 North American taxa sorted—Peck’s Hebeloma revisited. *Mycologia*, 114, 337-387. <https://doi.org/10.1080/00275514.2021.2012063>
- Farjon, A. (2023). *Pinus oocarpa*. In *Trees and Shrubs Online*. <http://www.treesandshrubsonline.org/articles/pinus/pinus-oocarpa/>
- Farjon, A. (2023). *Pinus oocarpa*. In *Trees and Shrubs Online*. <http://www.treesandshrubsonline.org/>
- Garibay-Orijel, R., Morales-Marañón, E., Domínguez-Gutiérrez, M., & Flores-García, A. (2013). Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 153–169. <https://doi.org/10.7550/rmb.29839>

- Garnica, J., & Cárdenas, O. (2019). Distribución espacial de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl . mediante la estimación de la densidad Kernel Spatial distribution of *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl . through estimating Kernel density. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.406>
- Gbadegesin, R. (1990). Effect of the ectomycorrhizal fungi *Rhizopogon luteolus* and *Pisolithus tinctorius* on growth of *Pinus oocarpa* in Nigeria. *Forest Ecology and Management*, 37, 303-307. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90098-V](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90098-V).
- Giráldez, N. A. (2011). *Medidas preventivas, correctoras y compensatorias del impacto ecológico de carreteras* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.6373>
- Gómez-Romero, M., Villegas, J., Sáenz-Romero, C., & Lindig-Cisneros, R. (2013). Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* en cárcavas. *Madera y Bosques*, 19(3), 51–63. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.1931195>
- González-Elizondo, Martha, González-Elizondo, M. Socorro, Ruacho-González, Lizeth, & Molina-Olvera, Moisés. (2011). *Pinus maximartinezii* Rzed. (Pinaceae), primer registro para Durango, segunda localidad para la especie. *Acta botánica mexicana*, (96), 33-48. <https://doi.org/10.21829/abm96.2011.257>
- Grobys, D., Roszkowska, M., Gawlak, M., Kmita, H., Kepel', A., Kepel, M., Parnikoza, I., Bartylak, T., & Kaczmarek, Ł. (2020). High diversity in the *Pseudechiniscus suillus*–*facettalis* complex (Heterotardigrada: Echiniscidae) with remarks on the morphology of the genus *Pseudechiniscus*. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 188, 733-752. <https://doi.org/10.1093/zoolinlean/zlz171>.
- Groves, A. M., Bauer, J. T., & Brudvig, L. A. (2020). Lasting signature of planting year weather on restored grasslands. *Scientific Reports*, 10(1), Article 1645. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62123-7>
- Hernández, Y., López, D., & Moya, F. (2019). Monitoreo ambiental como herramienta para el seguimiento continuo previsto en la evaluación de impacto ambiental. *Espacios*, 40(3), 17.
- Herrera, M., Yu, F.-Q., Ramos-Rendón, D., Martínez-Reyes, M., Hernández-Santiago, F., Chater, C. C. C., & Pérez-Moreno, J. (2022). Morphoanatomical and phylogenetic characterization of the ectomycorrhiza between *Laccaria squarrosa* with *Pinus pseudostrobus* and its relevance for reforestation programs. *Botanical Sciences*, 100(2), 397–411. <https://doi.org/10.17129/botsci.2830>
- Jha, S. S., & Songachan, L. S. (2023). Exploring the potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi as a biofertilizer. *Studies in Fungi*, 8(1). <https://doi.org/10.48130/SIF-2023-0017>
- Jha, S. K., & Thapa, S. (2025). Nutritional Composition of Wild Edible Mushrooms *Scleroderma cepa* and *Laccaria laccata*. *Journal of Nepal Biotechnology Association*, 6(1), 15–22. <https://doi.org/10.3126/jnba.v6i1.76914>

- Jha, S., & Thapa, S. (2025). Nutritional Composition of Wild Edible Mushrooms *Scleroderma cepa* and *Laccaria laccata*. *Journal of Nepal Biotechnology Association*. <https://doi.org/10.3126/jnba.v6i1.76914>
- Kuo, M. (2020). *Suillus kaibabensis*. MushroomExpert.Com. Recuperado de https://www.mushroomexpert.com/suillus_kaibabensis.html
- León, C., Moreno, J., Victoria, D., Suárez, J., Rojas, H., & Alvarado, A. (2018). Ectomycorrhizal inoculation with edible fungi increases plant growth and nutrient contents of *Pinus ayacahuite*. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 89, 1089-1099. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2018.4.2235>.
- Liu, Y., Li, X., & Kou, Y. (2020). Ectomycorrhizal fungi: Participation in nutrient turnover and community assembly pattern in forest ecosystems. *Forests*, 11(4), 453. <https://doi.org/10.3390/f11040453>
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. J., Giron, C., & Ciais, P. (2022). Monitoring global carbon emissions in 2021. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(4), 217–219. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00285-w>
- Loomis, J. J., & Dziedzic, M. (2018). Evaluating EIA systems' effectiveness: A state of the art. *Environmental Impact Assessment Review*, 68, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.10.005>
- López Mata, L., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2025). Regeneración, crecimiento y dinámica poblacional del pino azul *Pinus maximartinezii* Rzedowski (Versión 1.17) [Conjunto de datos]. <https://doi.org/10.15468/yxmivk>
- Martínez, A., Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-25149/v1>.
- Martínez-Reyes, M., Pérez-Moreno, J., Villarreal-Ruiz, L., Ferrera, R., Xoconostle-Cázares, B., Vargas-Hernández, J. J., & Honrubia-García, M. (2012). Crecimiento y contenido nutrimental de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con el hongo comestible ectomicorrízico *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2), 183-192. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.11>
- Martínez-Sifuentes, A., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *Iforest - Biogeosciences and Forestry*. <https://doi.org/10.3832/ifor3491-013>.

- McCormick, M. K., Whigham, D. F., & Canchani-Viruet, A. (2018). Mycorrhizal fungi affect orchid distribution and population dynamics. *New Phytologist*, 219(4), 1207-1215.. <https://doi.org/10.1111/nph.15223>
- Mello, A., & Balestrini, R. (2018). Recent insights on biological and ecological aspects of ectomycorrhizal fungi and their interactions. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 216. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00216>
- Montoya, A., Kong, A., Garibay-Orijel, R., Méndez-Espinoza, C., Tulloss, R., & Estrada-Torres, A. (2014). Availability of Wild Edible Fungi in La Malinche National Park, Mexico. , 2014, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/241806>.
- Oraon, P. R., Sagar, V., & Beauty, K. (2023). Ecological restoration of degraded land through afforestation activities. In *Land and environmental management through forestry* (pp. 201–216). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119910527.ch8>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2021). *Restauración de ecosistemas: Guía para principiantes*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/restauracion-de-ecosistemas-guia-para-principiantes>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). (2017). *OECD environmental performance reviews: Mexico 2013*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264208292-en>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). (2023). *Environmental performance reviews*. OECD Publishing. https://www.oecd-ilibrary.org/environment/environmental-performance-reviews_19900090
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE). (2024). *Environment at a glance indicators*. OECD Environmental Indicators Framework. <https://www.oecd.org/en/topics/environment-at-a-glance.html>
- Ortega, E. J. P. (2024). Un acercamiento al mundo de las ectomicorrizas. *Cultivos Tropicales*, 45(4), 1–7. <https://cu-id.com/2177/v33n4e10>
- Ortiz-Mendoza, R., Aguirre-Calderón, Ó., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E., & González-Tagle, M. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. , 12. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I64.710>.
- Páez, C., Gervers, K., Martin, J., Tabima, J., Luoma, D., & Spatafora, J. (2024). *Suillus hypogaeus*: First record of a truffle *Suillus*.. *Mycologia*, 1-11 . <https://doi.org/10.1080/00275514.2024.2361518>.
- Palamarchuk, M., Kirillov, D., & Shadrin, D. (2021). Morphology and molecular data of the species of *Suillus* (Suillaceae, Boletales) associated with *Pinus sibirica* at the European northeast of Russia. *Phytotaxa*, 490, 18-34. <https://doi.org/10.11646/PHYTOTAXA.490.1.2>.

Keywords: Soil degradation, Ectomycorrhizal symbiosis, Reforestation
Evaluación de Impacto Ambiental: sociología y semiótica de las asimetrías discursivas.
10.15446/rcs.v46n2.99056

- Pereira, G., Campos, J. L., Chávez, D., Anabalón, L., & Arriagada, C. (2014). Characterization of mycelial growth of ectomycorrhizal fungus *Lactarius aff. deliciosus* and its symbiosis with *Pinus radiata*. *Quebracho*, 22(1–2), 30–39. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722014000100003
- Pereira, H. M., Rosa, I. M. D., Martins, I. S., Kim, H., Leadley, P., Popp, A., van Vuuren, D. P., Ferrier, S., & Walters, M. (2020). Global trends in biodiversity and ecosystem services from 1900 to 2050. *Nature Communications*, 11(1), Article 3307. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17740-9>
- Pérez, E. G. E., Hidalgo, E. C., Robles, C., Gallegos, V. M., Martínez, G. M. S., & Rodríguez-Ortiz, G. (2023). Indicadores de calidad como herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad del suelo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.60158/rma.v10i1.376>
- Pérez-Moreno, J., & Read, D. J. (2004). Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivos que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. *Interciencia*, 29(5), 239–247. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442004000500002
- Pérez-Moreno, J., Martínez-Reyes, M., & Hernández-Santiago, F. (2021). Biotecnología de inoculación de árboles de importancia forestal con hongos ectomicorrízicos comestibles. *AgroDivulgación*. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1540>
- Pildain, M., Marchelli, P., Azpilicueta, M., Starik, C., & Barroetaveña, C. (2021). Understanding introduction history: Genetic structure and diversity of the edible ectomycorrhizal fungus, *Suillus luteus*, in Patagonia (Argentina). *Mycologia*, 113, 715 - 724. <https://doi.org/10.1080/00275514.2021.1909449>
- Rentería-Chávez, M. C., Pérez-Moreno, J., Cetina-Alcalá, V. M., Ferrera-Cerrato, R., & Xoconostle-Cázares, B. (2017). Transferencia de nutrientes y crecimiento de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con hongos comestibles ectomicorrízicos en dos sustratos. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(1), 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.06.004>
- Ryberg, M., Kalsoom, F., & Sánchez-García, M. (2022). On the evolution of ectomycorrhizal fungi. *Mycosphere*, 13(2), 1–24. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/si/1f/1>
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R., & Rehfeldt, G. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico: Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229, 340-350. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.04.014>

- Salazar, R., et al. (2022). Phenotypic variation and seedling emergence in *Pinus oocarpa* across altitudinal gradients in Oaxaca, Mexico. *New Forests*, 53(4), 567-582. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09876-9>
- Salgado-Salomón, M. E., Barroetaveña, C., Pildain, M. B., Kuhar, F., & Rajchenberg, M. (2017). *Tomentella* (Thelephorales, Basidiomycota) en bosques de Nothofagaceae de Patagonia, Argentina: Micorrizas de nuevas especies. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 52(3), 423–434. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722017000300003
- Sánchez-González, A. (2016). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera Y Bosques*, 14, 107-120. <https://doi.org/10.21829/MYB.2008.1411222>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis índice*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717580&fecha=31/12/2002
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual2.html
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). *Impacto ambiental y tipos de impacto ambiental*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/impacto-ambiental-y-tipos-de-impacto-ambiental>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). *Recursos forestales: Esquema Presión-Estado-Respuesta*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/07_forestales/07_forestales_esquema.html
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2020/indice.html
- Shi, J., Wang, X., & Wang, E. (2023). Mycorrhizal symbiosis in plant growth and stress adaptation: From genes to ecosystems. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 569–607. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-061722-090342>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>

- Smith, V. H., Neyra, A., & Schindler, D. W. (2021). Nutrient pollution and urban water quality: Trends and management implications. *Environmental Science & Technology*, 55(9), 5678–5689. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07527>
- Song, M. (2024). Ectomycorrhizal fungi: potential guardians of terrestrial ecosystems. *mLife*, 3(2), 123-135. <https://doi.org/10.1002/mlf2.12127>
- Soto-Gil, A. L., Velázquez-Martínez, A., Pérez-Moreno, J., Fierros-González, A. M., & Martínez-Reyes, M. (2022). Morfotipos ectomicorrícicos en retención estructural variable de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. *Madera y Bosques*, 28(2), Article e2822388. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822388>
- Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Junqueira, A. B., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K.-H., Brancalion, P., Buchanan, L., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P. F., ... Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 586(7831), 724–729. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>
- Szczepkowski, A., & Olenderek, T. (2017). *Suillus lakei* (Murrill) A. H. Sm. & Thiers (Boletales, Basidiomycota) in Poland: new data. , 52. <https://doi.org/10.5586/AM.1098>.
- Trávez, C. J. S., Salazar, M. J. N., Aragón, J. J. M., & Pozo, O. R. Q. (2024). Interacción suelo, planta, animal en el contexto de dos sistemas productivos desarrollados en ambientes ecológicos diferentes. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 474–486. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9431
- United Nations Environment Programme, International Resource Panel (UNEP). (2024). *Global resources outlook 2024: Bend the trend: Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>
- Universidad de Guanajuato. (2021). Pino azul, especie mexicana en peligro de extinción. <https://www.ugto.mx/noticias/noticias/educativas-nacionales/11176-pino-azul-especie-mexicana-en-peligro-de-extincion>
- Valdés, R. C., García, F. G., Tedersoo, L., Anslan, S., Cornejo-Oviedo, E. H., & Sánchez-Peña, S. (2020). Profiling the community structure of ectomycorrhizal fungi at endemic pine (*Pinus greggii*) stands of northeastern Mexico. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 82(3), 292–302. <https://doi.org/10.2989/20702620.2020.1733761>
- Visser, E., Kampmann, T., Wegrzyn, J., & Naidoo, S. (2023). Multispecies comparison of host responses to *Fusarium circinatum* challenge in tropical pines show consistency in resistance mechanisms.. *Plant, cell & environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.14522>.
- Volcão, L. M., Ramires, P. F., Tavella, R. A., Brum, R. L., Ramos, D. F., Bernardi, E., & da Silva Júnior, F. M. (2024). Antifungal activity of *Lactarius deliciosus* and *Laccaria*

laccata extracts against phytopathogenic fungi. *Gaia Scientia*, 17(3), 97–107.
<https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2023v17n2.65378>

Zhou, Y., Zhang, X., Wang, L., & Liu, J. (2022). A pressure-state-response-support framework for assessing regional water environmental carrying status. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article 1023180.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1023180>

CAPÍTULO 3. MODELO PRESIÓN-ESTADO-RESPUESTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS AMBIENTALES EN UN ECOSISTEMA FORESTAL PROTEGIDO

Resumen

El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, en Texcoco, Estado de México, con una extensión de 50.22 ha, posee gran importancia ecológica, cultural y económica. El objetivo de este estudio fue aplicar el modelo Presión-Estado-Respuesta en los ecosistemas forestales del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, con el propósito de identificar las presiones ambientales, evaluar el estado del sistema y analizar las respuestas de manejo implementadas. La información se obtuvo a través de entrevistas a autoridades, personal técnico, encuestas a 120 visitantes y observaciones de campo. Entre las principales presiones identificadas destacan el turismo, la invasión de especies exóticas y los incendios forestales. El estado del ecosistema refleja la riqueza del sitio, con presencia de 540 especies registradas y evidencia de recuperación de fauna nativa y aumento de flora local tras intervenciones de manejo. Las respuestas institucionales incluyen reforestación con especies nativas inoculadas con hongos ectomicorrízicos, programas de educación ambiental, manejo del fuego, monitoreo constante, inventarios y la elaboración del programa de manejo. El modelo PER permitió estructurar un diagnóstico integral que muestra un ecosistema resiliente, aunque se requiere fortalecer las estrategias de conservación con mayor financiamiento y acciones de sensibilización pública.

Palabras clave: gestión ambiental, turismo intensivo, riqueza biológica, impacto ambiental, Áreas Naturales Protegidas (ANP)

Abstract

The Molino de Flores Netzahualcoyotl National Park, located in Texcoco, State of Mexico, with an extension of 50.22 ha, holds significant ecological, cultural, and economic importance. The aim of this study was to apply the Pressure-State-Response (PSR) model in the forest ecosystems of Molino de Flores Netzahualcoyotl National Park in order to identify environmental pressures, assess the state of the system, and analyze the management responses implemented. Information was obtained through interviews with

authorities and technical staff, surveys of 120 visitors, and field observations. Among the main pressures identified are tourism, the invasion of exotic species, and forest fires. The state of the ecosystem reflects the site's richness, with 540 species recorded and evidence of recovery of native fauna and an increase in local flora after management interventions. Institutional responses include reforestation with native species inoculated with ectomycorrhizal fungi, environmental education programs, fire management, constant monitoring, inventories, and the development of a management program. The PSR model allowed for the structuring of a comprehensive diagnosis that highlights a resilient ecosystem, although conservation strategies still require reinforcement through greater funding and public awareness actions.

Key words: environmental management, intensive tourism, biological richness, environmental impact, Protected Natural Areas (PNA)

Introducción

Los ecosistemas forestales se enfrentan a diversas presiones ambientales crecientes, derivadas de actividades humanas, cambio climático y procesos de degradación que ponen en riesgo su equilibrio, funcionalidad ecológica y provisión de servicios ecosistémicos vitales (Albanbaeva *et al.*, 2025). En México, cerca del 70% de la extensión territorial está cubierto por ecosistemas forestales, lo que indica la necesidad de utilizar herramientas metodológicas sólidas para evaluar de forma integral los impactos ejercidos en el ambiente y con ello aportar elementos que orienten la toma de decisiones hacia una gestión sostenible (CONAFOR, 2021).

Con este objetivo, en 1993 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) desarrolló el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), con un marco conceptual simple que permite el análisis de las interacciones de las actividades antropogénicas con el medio ambiente mediante una lógica de causalidad. El modelo se organiza en tres componentes: Presión, asociada a factores humanos y naturales que afectan la resiliencia de los ecosistemas; Estado, que describe las condiciones actuales de los bosques; y Respuesta, referente a acciones y políticas de manejo sostenible (Solís-Mendoza *et al.*, 2025).

Su aplicación en ecosistemas forestales de México es relevante como una herramienta para diagnosticar al ecosistema y su manejo. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) integra este modelo como marco conceptual para la evaluación y gestión forestal en México. Lo que permite identificar presiones como la deforestación, incendios, cambio de uso de suelo y sobreexplotación de recursos; evaluar el estado mediante indicadores de biodiversidad, salud del suelo y provisión de servicios ecosistémicos; y el diseño de respuestas como programas de restauración, pagos por servicios ambientales, manejo del fuego y fortalecimiento de políticas implementables. Su incorporación al Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) favorece el monitoreo sistemático y la toma de decisiones basadas en evidencia científica (CONAFOR, 2021). Su implementación en diferentes contextos ha mostrado tanto avances como limitaciones. En Cihuatlán, Jalisco, por ejemplo, se identificaron presiones como la gestión inadecuada de residuos, degradación de la biodiversidad, vulnerabilidad al cambio climático y contaminación del aire, asociadas a la deficiente aplicación de leyes ambientales y a la baja prioridad institucional en materia de conservación (Vázquez-Valencia *et al.*, 2018).

El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN), se localiza en una zona de transición periurbana entre las áreas naturales y urbanas, representa un sitio de interés para la aplicación del modelo PER ya que experimenta diversas presiones ambientales derivadas del turismo, la urbanización, invasión de especies exóticas, entre otras, que amenazan su funcionalidad ecológica y riqueza biológica. Este se conserva mediante programas de educación ambiental y un esfuerzo permanente de las autoridades para mantener un equilibrio entre su conservación ecológica y cultural. Este estudio tiene como objetivo aplicar el modelo Presión-Estado-Respuesta en los ecosistemas forestales del PNMFN, con el propósito de identificar las presiones ambientales, evaluar el estado del ecosistema y analizar las respuestas de manejo implementadas.

Métodos

Zona de estudio

La investigación se desarrolló en el PNMFN ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México, el cual es un área natural protegida decretada en 1937, que se destaca por su gran relevancia ecológica, socioeconómica y cultural para la región. Abarca una superficie de 50.22 hectáreas, coordenadas geográficas aproximadas 19°31'N y 98°53'O y un rango altitudinal de 2, 250 y 2450 msnm. Se sitúa en una zona de transición entre el Altiplano Central Mexicano y los sistemas montañosos de San Miguel Tlaixpan, La Purificación, la sierra San Nicolás Tlaminca y Nativitas, dentro de la Cuenca del Valle de México (SEMARNAT, 2016).

Sus suelos predominantes son de origen volcánico, principalmente Regosoles y Andosoles, con texturas variantes de franco-arcillosa a arenosa. Los cuales muestran baja retención hídrica, signos de compactación y erosión en áreas degradadas (INEGI, 2020a). El clima es clasificado como templado subhúmedo (C(w0)(w)), con lluvias en verano, su temperatura media anual oscila entre 14 y 18 °C y la precipitación anual es variada de 600 a 800 mm, cuenta con una marcada estabilidad estacional lo que influye directamente en la dinámica de vegetación (INEGI, 2020b).

El PNMFN provee servicios ecosistémicos de regulación, provisión, culturales y recreativos, con una flora diversa (*Eucalyptus* sp., *Pinus* sp., *Fraxinus* sp., *Quercus* sp., *Abies religiosa*, etc.) y fauna representativa (*Sciurus* sp., *Bassariscus astutus*, *Cardinalis cardinalis*, etc.) (CONANP, 2023).

Se presenta el mapa del polígono correspondiente al Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, proporcionado por la Dirección del parque y con modificaciones de autoría propia para el presente trabajo, con la finalidad de representar las áreas que lo integran. En dicho mapa se muestra la zonificación interna del área natural protegida, la cual comprende las siguientes zonas: El Jardín, Vivero CONAFOR, Cuchilla, Vivero Alto, Casco, Ahuehuetes-Eucaliptos, Capilla, Aguacatera, La Loma, Loma Alta y Loma Baja (Figura 1).

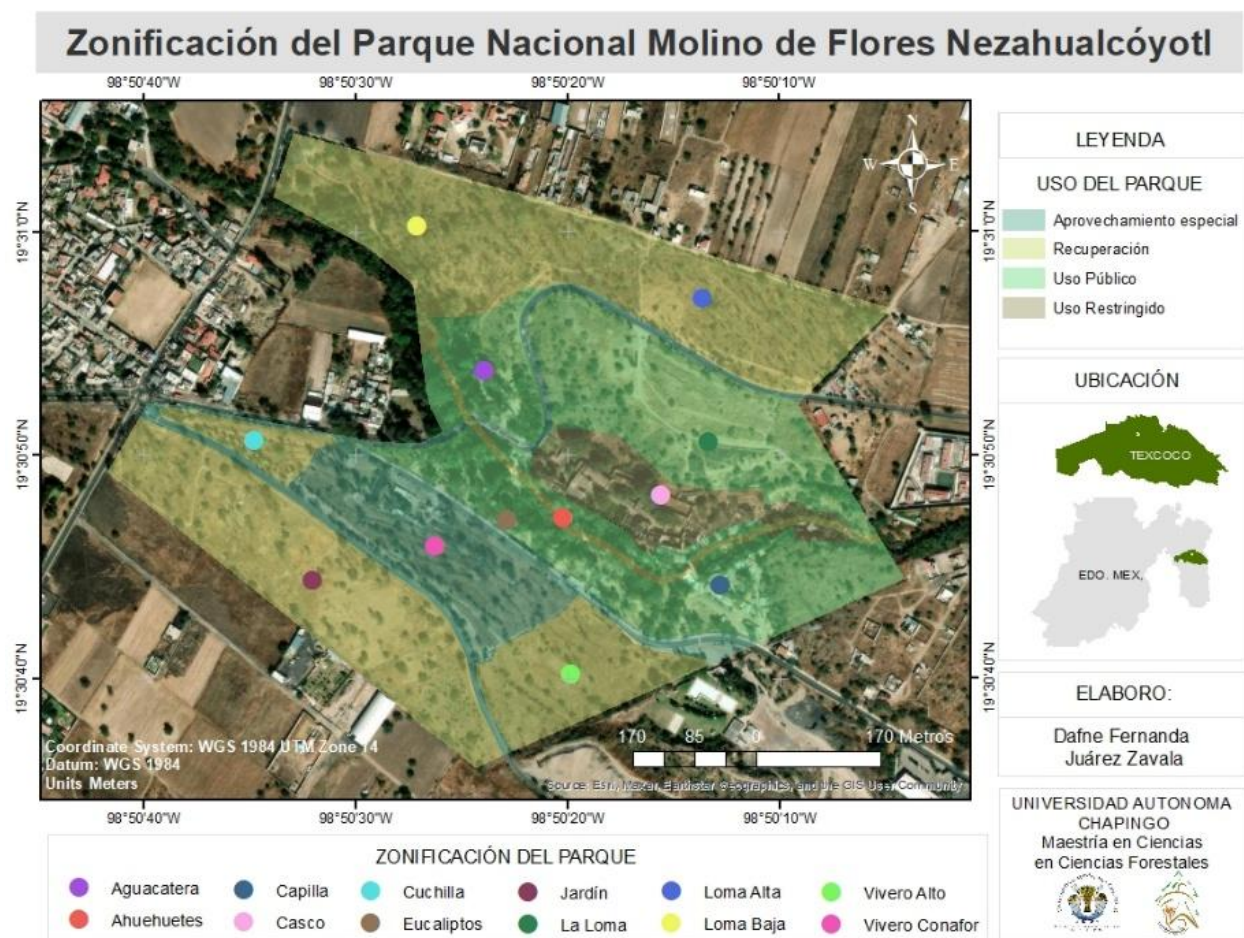


Figura 1. Ubicación y zonificación del PNMFN

Fuente: Elaboración propia

Evaluación de los impactos ambientales en el PNMFN a través del modelo Presión-Estado-Respuesta

Para evaluar los impactos ambientales en el PNMFN, se adoptó un enfoque mixto cuantitativo-cualitativo basado en el modelo PER de la OCDE, elaborado en 1993, adaptado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para su aplicación en ecosistemas forestales, como se muestra en la Figura 2 (SEMARNAT, 2014). Este modelo permitió analizar las relaciones causales entre las actividades humanas, el estado actual del ambiente y las respuestas institucionales mediante la identificación de indicadores de presión (P), estado (E) y respuesta (R).



Figura 2. Esquema PER en sectores forestales en México. Fuente: Elaboración propia según la adaptación de SEMARNAT (2014) en recursos forestales

Para el levantamiento de información social, se realizaron entrevistas dirigidas al director encargado del parque y una técnica de la brigada ecologista, con el objetivo de documentar las acciones generadoras de presión, las condiciones actuales del ecosistema y las actividades de gestión implementadas como respuesta ante estas presiones. Las entrevistas se realizaron con un guion estructurado siguiendo recomendaciones metodológicas para estudios de percepción ambiental (Díaz-Pérez et al., 2025).

Además, se encuestaron aleatoriamente 120 visitantes mediante el método de muestreo aleatorio simple durante la jornada. Con una población anual estimada en 120 000 visitantes, este tamaño muestral proporciona una precisión aproximada de $\pm 9\%$ para estimaciones de proporciones al 95% de confianza ($p=0.5$, $z=1.96$). Dada la naturaleza exploratoria del estudio y las limitaciones logísticas, se priorizó obtener un muestreo aleatorio en campo y combinarlo con entrevistas semi-estructuradas y observación directa para fortalecer las inferencias. Esto se demuestra a continuación:

- Población anual de visitantes (N)=120,000
- Tamaño de la muestra (n)=120
- Proporción conservadora (p)=0.5, la que maximiza la varianza
- Nivel de confianza = 95% (z=1.96)

$$ME = z \times \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \approx 1.96 \times \sqrt{\frac{0.25}{120}} \approx 0.09$$

O sea, un margen de error de aproximadamente $\pm 9\%$

Este instrumento permitió explorar su percepción del estado del ecosistema, las actividades recreativas que se llevan a cabo dentro del parque y su conocimiento sobre medidas de conservación. Las encuestas son una herramienta útil para detectar patrones en el uso de recursos, analizar las actitudes ante la conservación y colaborar en las estrategias de manejo con un enfoque participativo (Díaz-Pérez et al., 2025).

Se realizaron algunos recorridos en diferentes zonas del parque para registrar evidencias directas de indicadores de presión antrópica, tales como presencia de residuos sólidos, evidencias de incendios, compactación del suelo, entre otras, con el fin de validar la información obtenida en entrevistas y encuestas. Estos recorridos fortalecieron el establecimiento de indicadores de estado, especialmente en el ámbito vegetal (Ugalde et al., 2023).

Para la construcción del modelo PER del PNMFN, se elaboró un esquema integrador, en el que se categorizaron e identificaron los principales factores de presión, el estado actual del ecosistema y las respuestas institucionales. La información recopilada se sometió a un proceso de análisis que integró los datos cualitativos y cuantitativos de las entrevistas y las observaciones directas en campo.

Por medio de la elaboración de este esquema en el PNMFN se logró estructurar la información de forma sistémica y detectar las principales presiones ambientales, conocer el estado del ecosistema y analizar las respuestas de manejo implementadas.

Resultados y discusión

La aplicación de modelo PER en el PNMFN permitió la identificación de los principales impactos ambientales que alteran el ecosistema forestal, evaluar el estado del ecosistema y analizar las respuestas de la institución. Los indicadores se organizaron en el esquema de la Figura 3, que sintetiza las relaciones causales entre presiones, estados y respuestas.



Figura 2. Modelo Presión-Estado-Respuesta aplicado en el PNMFN con un enfoque a su ecosistema forestal

Fuente: Elaboración propia, basado en el esquema modificado por SEMARNAT, 2012.

La implementación del modelo PER en el PNMFN, aportó un marco analítico sólido para evaluar las dinámicas socioecológicas que alteran la integridad ecológica del ecosistema forestal, tal como lo propone SEMARNAT (2014) en el ANP. Los resultados muestran una compleja interacción entre las presiones humanas y naturales, el estado actual de la biodiversidad ecosistémica y las respuestas institucionales implementadas. En México, la aplicación del Modelo PER en el ámbito forestal se documentó los años 2006 y 2013, el más reciente es el de Vázquez-Valencia *et al.*, (2018), en Cihuatlán, Jalisco, los autores reportan indicadores de presión, relacionados con la inadecuada gestión de residuos, la vulnerabilidad al cambio climático, la contaminación atmosférica y la degradación de la biodiversidad. En cuanto a los indicadores de estado, señalan el deterioro del ecosistema, donde fue evidente la pérdida de biodiversidad que afecta la calidad de vida del municipio. Así mismo, destacan que las respuestas institucionales son insuficientes, resaltando la ineficacia de la aplicación de la legislación existente.

Se ha demostrado que los marcos conceptuales como este modelo permiten abordar simultáneamente aspectos físicos, legales, sociales y políticos, promoviendo así una visión integral para la gestión forestal. Solís-Mendoza *et al.* (2025) indica que facilita la comprensión de los procesos causa-efecto y la identificación de estrategias adaptativas, como la gobernanza policéntrica, el mantenimiento de la biodiversidad y manejo forestal diversificado con la finalidad de enfrentarse a presiones como el cambio climático, globalización mercantil y políticas forestales desactualizadas que interfieren con la riqueza biológica, resiliencia y sustentos vitalicios locales.

Indicadores de presión

El análisis de presiones humanas y naturales permitió identificar los diversos factores que influyen en la integridad del ecosistema del PNMFN. El turismo intensivo representa una presión significativa, con una afluencia anual de 100,000 a 120,000 visitantes concentrados principalmente en áreas comerciales y la zona de los ahuehuetes, la encuesta mostró que las principales actividades que se realizan son recreativas. Esta concentración de turistas en el parque genera una notable acumulación de residuos sólidos urbanos orgánicos e inorgánicos, problema que señalan el director del parque, la técnica brigadista y el 58.3% de los encuestados lo identifico como el impacto ambiental

más visible. Por lo que las actividades recreativas y comerciales surgen como uno de los principales detonantes de deterioro ambiental.

Esto coincide con diversos estudios en ANP mexicanas que muestran que el turismo intensivo, aunque representa una importante actividad económica, también representa una fuente directa de daños ambientales, principalmente por la por la acumulación de residuos sólidos, ocasiona compactación, erosión del suelo, pérdida de vegetación nativa y alteración de hábitats. En este ámbito, los hallazgos del PNMFN son consistentes con lo reportado en diversos estudios. Al respecto, (Mendoza-González *et al.*, 2021) citan que el turismo no regulado genera impactos significativos, como contaminación por residuos y compactación del suelo, lo que compromete las propiedades edáficas y refleja la vulnerabilidad de los ecosistemas ante las actividades humanas. Asimismo, Pérez & Flores (2019) indican que, en sitios como Piedra Herrada, en la comunidad de San Mateo Almomoloa, municipio de Temascaltepec, Estado de México, la sobrecarga de visitantes ha rebasado la capacidad de carga, derivando la compactación del suelo y disminución de la biodiversidad, con el riesgo de una considerable reducción de especies emblemáticas como la mariposa monarca. Lo anterior coincide con lo reportado por Lara *et al.* (2021), quienes en Baja California Sur documentaron que el turismo no planificado disminuyó la geomorfología natural en más de 40%, incrementando así la vulnerabilidad ambiental y la amenaza a la riqueza local. Otro caso relevante en México es en el parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, donde esta actividad contribuye a la degradación ambiental a través de la sobreexplotación de recursos, acumulación de residuos sólidos, contaminación del aire y del agua, compactación edáfica y cambios de uso de suelo, lo que disminuye el equilibrio ecológico y la disponibilidad de servicios ecosistémicos (Baloch *et al.*, 2022).

Una presión importante, es la presencia de especies exóticas invasoras, con especies como *Ricinus communis* (higuerilla) y *Leonotis nepetifolia* (bola de rey), mismas que fueron documentadas en el área. La invasión de especies exóticas interfiere en los procesos de regeneración natural, específicamente en comunidades herbáceas y arbustivas, disminuyendo su biodiversidad (CONABIO, 2023). La fauna domestica como perros y gatos constituye una presión directa sobre la fauna nativa; este comportamiento

en el PNMFN refleja una problemática documentada en ANP mexicanas. El control de especies invasoras en ANP promueve la regeneración de comunidades nativas, pero su éxito depende de la combinación de remoción, manejo de factores ecológicos, restauración activa y monitoreo continuo (Ibáñez, 2025).

Los incendios forestales son una presión recurrente, originándose de la combustión en materiales ligeros como pastos y arbustos, extendiéndose sobre la cobertura del suelo. La evidencia documentada respalda que, respecto a las presiones naturales, los incendios forestales representan una amenaza relevante, ya que además de degradar a la vegetación, liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, retroalimentando el cambio climático (Gajendiran *et al.*, 2023).

En el PNMFN, también se manifiesta el cambio climático a través de la proliferación de *Tillandsia recurvata* (heno motita), fenómeno que compromete la sanidad forestal, al modificar la estructura del dosel arbóreo y causar efectos adversos en la vitalidad de los árboles, trayendo consigo condiciones favorables para la proliferación de patógenos que dañan la salud de la vegetación. Diversos estudios destacan que este fenómeno incrementa la incidencia de plagas y patógenos, provocando mortalidad masiva en árboles, especialmente cuando se combina el déficit de humedad en el suelo y el desplazamiento altitudinal de especies, alterando así la dinámica energética de las comunidades forestales (Sandoval-García *et al.*, 2024).

La expansión urbana representa una de las mayores amenazas, que se asocia al crecimiento demográfico municipal, se indicó que las zonas con mayor riesgo son las periferias al parque y próximas a las vías de comunicación y límites administrativos del parque. Un ejemplo del desarrollo urbano circundante es la construcción de un fraccionamiento adyacente al área de “El jardín”, lo que incrementa la presión sobre los recursos naturales y la fragmentación del ecosistema. Estas observaciones son relevantes considerando que el desarrollo inmobiliario reduce conectividad ecológica, lo que afecta la biodiversidad y limita la capacidad de las ANP para cumplir con su función de conservación, especialmente en zonas periurbanas y metropolitanas (Aguilar *et al.*, 2022). Este impacto es también evidente en el Parque Nacional Nevado de Toluca, donde la proximidad a centros urbanos genera emisiones contaminantes que derivan en

precipitaciones ácidas y degradación del suelo (García-Solorio *et al.*, 2022). De acuerdo con Aguilar *et al.* (2022), este fenómeno impulsa la transformación de suelos de conservación en áreas urbanas, lo que reduce la superficie forestal y agrícola, esto genera disminución en la recarga hídrica y regulación climática. Al respecto, Caro-Borrero *et al.* (2021) indican que la expansión urbana en zonas protegidas, como en la microcuenca del río Magdalena en la Ciudad de México, incrementa la contaminación por nutrientes, residuos domésticos y aguas residuales, graves daños que disminuyen la calidad ambiental y aumentan riesgos para la salud humana.

El director encargado del ANP mencionó que la ubicación del parque en una zona de transición altitudinal ocasiona desequilibrios en las condiciones edáficas y climáticas, lo que puede influir en el condicionamiento de la selección de especies para la implementación de programas de reforestación. Esto, junto con el uso agrícola histórico del suelo, explica los problemas derivados de reforestaciones pasadas con especies poco adaptadas, principalmente *Pinus* sp., cuya supervivencia es reducida, lo que se observó en intentos previos de restauración. Lo anterior, es relevante cuando se considera que la plantación de especies no adaptadas en programas de reforestación, como *Pinus* sp., limita las tasas de supervivencia debido a las restricciones nutricionales e hídricas, un riesgo potencial en el contexto del PNMFN principalmente durante las temporadas de sequía (Juan-Ovejero *et al.*, 2022). La situación se complica cuando hay bajo aporte de recursos económicos gubernamentales, lo cual limita la capacidad operativa y de monitoreo en las ANP. En el futuro se debe continuar con la prevención de reforestaciones con especies no aptas para no limitar los procesos de regeneración natural del ecosistema.

La falta de recursos económicos constituye una presión identificada en el parque que limita la implementación de proyectos de restauración, monitoreo y conservación. Por lo que el bajo aporte financiero del gobierno representa una presión indirecta que influye en la posibilidad de implementar proyectos de análisis, restauración, monitoreo y conservación, incluyendo la falta de laboratorios especializados y recursos que contribuyan con la caracterización detallada del parque (Baker & Gittman, 2024).

Indicadores de estado

La evaluación del estado del ecosistema forestal del PNMFN mostró que el ecosistema mantiene una riqueza biológica considerable, con 540 especies registradas de fauna y flora. Esto destaca por su relevancia como núcleo de conservación ya que mantiene una importante diversidad específica. A pesar de su menor extensión comparada con otras ANP mexicanas como el Parque Nacional Lago de Texcoco que alberga 370 especies de fauna y 250 de flora en sus 14,000 hectáreas, el PNMFN muestra una notable densidad de especies por unidad de superficie (CONAGUA, 2025).

Se identificó que la estructura de la vegetación presenta una dominancia de especies introducidas por reforestaciones, principalmente *Pinus* sp., *Eucalyptus* sp. y *Quercus* sp. Esta situación se refleja como un patrón documentado, donde la dominancia de especies introducidas en su estructura vegetal genera una homogeneización estructural y funcional, que compromete la resiliencia ecológica a largo plazo (Arnesi *et al.*, 2024). Además, las acciones de remoción de especies exóticas invasoras realizadas en los años 2024 y 2025 favorecen el incremento en la densidad de especies nativas, particularmente en comunidades arbustivas y herbáceas, esto se corroboró por el director del parque y la técnica brigadista, que registraron el incremento de densidad poblacional de dichas especies durante recorridos de campo e inventarios florísticos. Estas medidas permiten la recuperación de la flora nativa. Según Maynard-Bean & Kaye (2019), dichas intervenciones son eficientes para la estabilidad y reestructuración de las comunidades nativas, lo cual coincide con las observaciones en el área de estudio. Asimismo, Jiménez-Hernández *et al.*, (2023) evaluaron la remoción de *Hedera helix* (hiedra invasora) en bosques templados de la Ciudad de México, lo que permitió la recuperación de especies nativas y una composición florística similar a la de sitios no invadidos en solamente un año, esto resalta la rápida respuesta de la vegetación nativa tras la eliminación invasora, fortaleciendo la resiliencia de ecosistemas alterados.

La fauna silvestre ha mostrado una respuesta positiva tras las medidas de restricción al acceso del parque implementadas durante la pandemia de COVID-19 en 2020. Según lo reportado por el director del parque y la técnica brigadista, se presentó un incremento en la abundancia y distribución de especies como tlacuaches (*Didelphis virginiana*),

cacomixtles (*Bassariscus astutus*) y ardillas (*Sciurus* sp.), ocupando áreas donde previamente estaban ausentes o restringidas a zonas específicas como el Vivero CONAFOR. Estos resultados positivos coinciden con lo reportado por Ewart *et al.* (2024), quienes indican que la abundancia de fauna nativa es significativamente menor en zonas no protegidas o con mayor presencia humana y de fauna doméstica. Tal situación es notable en el parque, con el aumento en la densidad poblacional de especies, a partir de la restricción del acceso a zonas específicas del ANP.

Respecto a las condiciones edáficas, presentan evidencia de degradación en zonas tránsito frecuente, con compactación visible y pérdida de materia orgánica como producto de los incendios forestales. Agbeshie *et al.* (2022) indican que los incendios severos consumen materia orgánica superficial, reducen el carbono orgánico y afectan la estabilidad de los agregados del suelo, también mencionan que el tránsito frecuente incrementa la compactación, limitando la infiltración de agua y favoreciendo la erosión. Sin embargo, los procesos erosivos en el PNMFN se encuentran en niveles mínimos ya que se cuenta con una zona de acumulación natural en el río y la estabilidad que aporta la vegetación remanente. El director responsable mencionó que, en la década de 1990, el área de “El jardín” recibió la incorporación de suelos exógenos provenientes de actividades asociadas a la construcción de una plaza comercial cercana. Se desconoce la procedencia y calidad de dichos suelos, lo que genera una amplia variabilidad en las características de este y el relieve de la zona (Agbeshie *et al.*, 2022).

Indicadores de respuesta

Las respuestas institucionales implementadas integran diversos componentes de restauración ecológica y gestión ambiental. Los programas de rehabilitación forestal abarcan 5 hectáreas desde el año 2020, utilizando especies nativas adaptadas a las condiciones climáticas locales como *Vachellia farnesiana*, *Quercus* sp., *Pinus* sp. inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles y *Acacia farnesiana*, logrando una tasa de supervivencia superior al 60%. Así mismo, se estableció un vivero para la producción de plantas inoculadas con micorrizas, lo que representa una innovación tecnológica relevante para los procesos de recuperación y restauración del parque.

Estas acciones de reforestación con especies adaptadas a las condiciones ambientales del parque y la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles constituyen una estrategia adecuada, dado a que esta simbiosis mutualista favorece la absorción de nutrientes y agua debido a la colonización de raíces, mejorando significativamente la supervivencia bajo condiciones adversas (Rodríguez-Gómez-Tagle *et al.*, 2024). Diversos estudios refuerzan su potencial como estrategia de restauración ecológica en suelos degradados, áridos o contaminado en comparación con el uso de plántulas no inoculadas, pero es importante considerar que su efectividad depende de la compatibilidad entre el hongo y la especie de pino, así como su adaptación a las condiciones locales (Policelli *et al.*, 2020); estas acciones, junto con la remoción de especies nocivas, originan resultados alentadores, particularmente en las áreas cercanas al bosque de galería y de los estacionamientos.

En el PNMFN se han establecido indicadores para evaluar el estado de conservación, incluyendo el seguimiento de la supervivencia vegetal, evaluación de sanidad forestal, así como monitoreos e inventarios sistemáticos para identificar y caracterizar las especies que integran los diferentes ecosistemas del parque. Este enfoque integral ha sido eficiente en la región y en otras zonas, así como en diversas regiones. Ortiz *et al.* (2024) indican que, para medir el estado ecológico de un ecosistema ripario de la cuenca de México, emplean diversos indicadores como inventarios de especies, monitoreo de cobertura, composición vegetativa y la proporción de especies nativas vs. introducidas. Pío-León *et al.* (2024) incluyen conteos de riqueza y endemismo, inventarios de flora y fauna, y registros georrefenciados para identificar áreas prioritarias y vacíos de información, tal como se emplea en el PNMFN.

Los programas de limpieza y educación ambiental en 2023 tuvieron un alcance de 200 participantes, aunque su impacto aun es limitado, tomando en cuenta que el 43% de los visitantes encuestados no percibió las acciones de reforestación implementadas. Los programas de educación ambiental muestran un avance en la sensibilización de visitantes, aunque su impacto es aún limitado en relación con la elevada afluencia turística. Mahbubi *et al.* (2025) mencionan que la integración de estrategias de

comunicación, como medios digitales y talleres participativos puede mejorar la efectividad de conservación.

La gestión de los incendios comprende la implementación de brechas cortafuego, quemas controladas y actividades de limpieza preventiva, complementadas con capacitación especializada al personal técnico del parque y su coordinación con bomberos y protección civil municipal. Estas acciones contribuyen con la reducción de la incidencia incendios. Gómez-Mendoza *et al.* (2021) respaldan que las quemas prescritas y tratamientos mecánicos son eficaces para reducir riesgos bosques mexicanos de pino. Asimismo, Gao *et al.* (2024) documentan reducciones superiores al 50% en incendios cuando se implementan medidas preventivas. Sin embargo, la recurrencia de estos eventos en el parque subraya la necesidad de fortalecer el monitoreo mediante tecnologías avanzadas y la capacitación continua, frente a las limitaciones presupuestales.

En la última década, se estableció un sistema de colaboración con instituciones académicas con el fin de implementar acciones de conservación, con esto se permite el fortalecimiento e identificación de áreas prioritarias, desarrollando proyectos colaborativos enfocados en la restauración ecológicas del parque. Gonzalez *et al.* (2023), mencionan que la colaboración con instituciones académicas aporta rigor metodológico, acceso tecnológico y análisis integrales, lo que fomenta la capacitación local y la gestión adaptativa. Además, se implementó un programa de monitoreo de la composición y estructura de los recursos naturales en las zonas de bosque y matorral, guiados por los protocolos establecidos por la CONANP, lo que permite el seguimiento de los cambios de la biodiversidad y la evaluación de las medidas de conservación implementadas, considerando también la conectividad local con programas de capacitación dirigidos a jóvenes y población general local, con actividades como la apicultura y la sensibilización ambiental. La CONANP gestiona una amplia red de ANP en México, lo que requiere sistemas de monitoreo para evaluar cambios en la biodiversidad y responder a amenazas como el cambio climático, el uso de suelo y actividades ilícitas (Chavez, 2022).

Se han establecido acuerdos con los comerciantes para la definición del uso público y la restricción a áreas de aprovechamiento especial o de protección, permitiendo la

continuidad de sus actividades económicas de una manera más amigable con los sitios de conservación del ANP. La limitación de acceso a ciertas áreas del parque fue favorable para la conservación de los ecosistemas, facilitando la recuperación de especies faunísticas y el establecimiento de hábitats aptos para su conservación, todo esto a partir de la implementación de estas restricciones durante la pandemia de COVID-19. Como parte de ello, se estableció un sistema de monitoreo del turismo no regulado, desarrollando medidas de control para aminorar los impactos ambientales negativos producidos por la actividad antropogénica. Lo que es importante, ya que la presión humana reduce la capacidad de los ecosistemas de resiliencia, aumentando riesgo de colapso y pérdida de biodiversidad (Keith *et al.*, 2023).

También se elaboró un programa de manejo, próximo a su publicación, donde se incluye una zonificación de sitios prioritarios de conservación o de uso público y un listado de especies y su abundancia relativa. Este programa representa una respuesta integral para el conocimiento de la composición de especies y optimización del manejo del ecosistema. La zonificación permite aplicar medidas específicas según las necesidades y características de cada zona, optimizando resultados al reducir problemáticas entre el desarrollo y la conservación (Xie *et al.*, 2024). El empleo de protocolos estandarizados y herramientas de la CONANP garantiza la comparabilidad con otras ANP, favoreciendo la gestión integral basada en conocimiento social, ecológico, técnico y económico (CONANP & SEMARNAT, 2020).

Conclusión

La aplicación del modelo PER en el PNMFN permitió identificar que el turismo intensivo, la expansión urbana y la presencia de especies invasoras corresponden a los indicadores ambientales de presión. Los indicadores de estado fueron la riqueza biológica, con 540 especies de flora y fauna registradas, y la resiliencia del ecosistema. Los indicadores de respuesta incluyeron los monitoreos constantes, la reforestación con especies nativas inoculadas con hongos ectomicorrízicos, el manejo del fuego y la remoción de especies invasoras, tareas que favorecen la recuperación del ecosistema forestal.

Se recomienda continuar con el monitoreo constante de la capacidad de carga turística, ampliar el alcance de los programas de educación ambiental y las reforestaciones con árboles inoculados con ectomicorrizas para la recuperación ecológica del parque. Así mismo, se requiere mayor financiamiento gubernamental que asegure la continuidad de las estrategias de conservación.

Referencias bibliográficas

- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Aguilar, A. G., Flores, M. A., & Lara, L. F. (2022). Peri-Urbanization and Land Use Fragmentation in Mexico City. Informality, Environmental Deterioration, and Ineffective Urban Policy. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790474>
- Albanbaeva, D., Amerkulova, Z., Chaldanbaeva, A., Zainiev, R., & Asanov, R. (2025). Monitoring economic risks associated with forest landscape degradation. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 82-107. <https://doi.org/10.31548/forest/1.2025.82>
- Arnesi, E. A., López, D. R., & Barberis, I. M. (2024). Relationship between degradation and the structural-functional complexity of subtropical xerophytic forests in the Argentine Wet Chaco. *Forest Ecology and Management*, 562, 121957. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121957>
- Baker, R., & Gittman, R. (2024). Co-Funding Robust Monitoring with Living Shoreline Construction is Critical for Maximizing Beneficial Outcomes. *Estuaries and Coasts*, 48. <https://doi.org/10.1007/s12237-024-01433-9>
- Baloch, Q., Shah, S., Iqbal, N., Sheeraz, M., Asadullah, M., Mahar, S., & Khan, A. (2022). Impact of tourism development upon environmental sustainability: A suggested framework for sustainable ecotourism. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 5917-5930. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22496-w>

- Caro-Borrero, A., Carmona-Jiménez, J., Rivera-Ramírez, K., & Bieber, K. (2021). The effects of urbanization on aquatic ecosystems in peri-urban protected areas of Mexico City: The contradictory discourse of conservation amid expansion of informal settlements. *Land Use Policy*, 102, 105226. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105226>
- Chavez, L. E. V. (2022). The invisible impacts of violence and crime on biodiversity and communities in Mexican natural protected areas. *Biodiversity*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14888386.2022.2149621>
- CONAGUA. (2025). Parque Ecológico Lago de Texcoco. gob.mx. <http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/proyecto-ecologico-lago-de-texcoco>
- CONABIO. (2023). Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras en México: Prevención, control y erradicación. https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/janium_login_opac.pl?find&ficha_no=6643
- CONANP. (2023). <https://descubreanp.conanp.gob.mx/es/conanp/ANP?suri=113>
- CONANP & SEMARNAT. (2020). Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024. gob.mx. <http://www.gob.mx/conanp/documentos/programa-nacional-de-areas-naturales-protegidas-2020-2024>
- CONAFOR (2021). Programa Nacional Forestal 2020-2024. Comisión Nacional Forestal, México. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2021/Programa_Nacional_Forestal_PNF_2020-2024.pdf
- Díaz-Pérez, F. M. a, García-González, C. G., Fyall, A., Fu, X., Deel, G., & Fernandez-Hdez, C. (2025). The altered perceptions of visitors to national parks: A comparison between a pre and post-covid-19 periods. *Social Sciences & Humanities Open*, 11, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.101219>
- Ewart, H., Pasqualotto, N., Montanheiro Paolino, R., Jensen, K., & Chiarello, A. (2024). Effects of anthropogenic disturbance and land cover protection on the behavioural

- patterns and abundance of Brazilian mammals. *Global Ecology and Conservation*, 50, NA. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02839>
- Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2023). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240, 117537. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537>
- Gao, M., Chen, S., Suo, A., Chen, F., & Liu, X. (2024). Response of Fuel Characteristics, Potential Fire Behavior, and Understory Vegetation Diversity to Thinning in *Platycladus orientalis* Forest in Beijing, China. *Forests*, 15(9), 1667. <https://doi.org/10.3390/f15091667>
- García-Solorio, L., Muro, C., De La Rosa, I., Amador-Muñoz, O., & Ponce-Vélez, G. (2022). Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in high mountain lakes, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(32), 49291-49308. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19177-z>
- Gómez-Mendoza, F. F., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2021). Fuego, mortalidad y rebrotación en especies forestales de la Sierra Norte de Puebla. *Madera y bosques*, 27(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732148>
- Gonzalez, A., Chase, J., & O'Connor, M. (2023). A framework for the detection and attribution of biodiversity change. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 378, 20220182. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0182>
- Ibáñez, I. (2025). Successful recovery of native plants post-invasive removal in forest understories is driven by native community features. *Ecological Applications*, 35. <https://doi.org/10.1002/eap.70012>
- INEGI. (2020a). Edafología. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI. (2020b). Climatología. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Jiménez-Hernández, H., Bonilla Valencia, L., Martínez-Orea, Y., Zamora-Almazan, M., Espinosa-García, F., & Argüero, S. (2023). Effects of *Hedera helix* L. removal on

the understory early regeneration in an oak temperate forest in Mexico City. *Ecological Processes*, 12. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00443-y>

Juan-Ovejero, R., Castro, J., & Querejeta, J. I. (2022). Low acclimation potential compromises the performance of water-stressed pine saplings under Mediterranean xeric conditions. *Science of The Total Environment*, 831, 154797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154797>

Keith, D. A., Benson, D. H., Baird, I. R. C., Watts, L., Simpson, C. C., Krogh, M., Gorissen, S., Ferrer-Paris, J. R., & Mason, T. J. (2023). Effects of interactions between anthropogenic stressors and recurring perturbations on ecosystem resilience and collapse. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 37(1), e13995. <https://doi.org/10.1111/cobi.13995>

Lara, P., J. A., Guevara Sanginés, A., Pérez Cirera, V., Arias Martelo, C., Jiménez Quiroga, C. I., (2021). Economic spillover from Natural Protected Areas to conventional tourist destinations. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(67), 745-774. <https://doi.org/10.22136/est20211690>

Mahbubi, M., Cholili, A., Syi'bul Huda, A. A., & Shuhada. (2025). Enhancing Educational Quality Through Effective Communication in Private Universities. *Journal of Education and Learning Sciences*, 5, 25-38. <https://doi.org/10.56404/jels.v5i1.124>

Maynard-Bean, E., & Kaye, M. (2019). Invasive shrub removal benefits native plants in an eastern deciduous forest of North America. *Invasive Plant Science and Management*, 12, 3-10. <https://doi.org/10.1017/inp.2018.35>

Mendoza-González, G., Martínez, M., Lithgow, D., Perez-Maqueo, O., & Simonin, P. (2012). Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics*, 82, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.07.018>

Ortiz, F., R., Carmona Jiménez, J., Temis García, L. G., Caro Borrero, Á. P., & González Hidalgo, B. (2024). The hydromorphological quality of the basin of Mexico: A proposal of its indicator value of the ecological state in the riparian ecosystem.

Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 40.
<https://doi.org/10.20937/rica.54895>

Pérez, R., C., & Flores Montes, A. (2019). Turismo rural, impacto ambiental y resiliencia en Piedra Herrada, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 16(4), 429-450.

Pío-León, J. F., Munguía-Lino, G., González-Gallegos, J. G., & González-Elizondo, M. (2024). Priority areas for conservation based on endemic vascular plant species and their biocultural attributes: A case study in Sinaloa, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95, e955446-e955446.
<https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2024.95.5446>

Policelli, N., Horton, T., Hudon, A., Patterson, T., & Bhatnagar, J. (2020). Back to Roots: The Role of Ectomycorrhizal Fungi in Boreal and Temperate Forest Restoration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00097>

Rodríguez-Gómez-Tagle, G., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Pérez-Moreno, J. (2024). Diversidad de morfotipos de hongos ectomicorrizógenos y adaptación al hospedero en poblaciones contrastantes de *Pinus greggii* var. *Australis* (Pinaceae). *Acta botánica mexicana*, 131.
<https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2151>

Sandoval-García, C., Mendez, J., Flores, A., Villavicencio-Gutiérrez, E., Paz Pellat, F., Flores López, C., Cornejo-Oviedo, E., Zermeño-González, A., Sosa Díaz, L., García, M., & Villarreal-Quintanilla, J. A. (2024). Mapping the Future: Climate-Induced Changes in Biomass Density Across Mexico's Coniferous Forests. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1465.v1>

SEMARNAT. (2014). Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/07_forestales/07_forestales_esquema.html

SEMARNAT. (2016). 79 aniversario del Molino de Flores Nezahualcóyotl. Gobierno de México. Recuperado el 30 de septiembre de 2025, de

<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/79-aniversario-del-molino-de-flores-netzahualcoyotl>

Solís-Mendoza, L. E., Galicia, L., Ávila-Foucat, S. V., & Mwampamba, T. H. (2025). Conceptual model of social-ecological resilience in Mexican forests communities. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1490278>

Vázquez-Valencia, R. A., & García-Almada, R. M. (2018). Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. *Nóesis. Revista de ciencias sociales*, 27(53-1), 1-26. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.3.1>

Xie, Y., Wang, S., Xiang, S., Wang, Z., Li, Y., Wang, Z., Zhou, M., Wang, Y., & Gao, M. (2024). Ecological zoning and dynamic assessment of effectiveness in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Ecological Modelling*, 487, 110563. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110563>

CAPÍTULO 4. ECTOMICORRIZAS EN SUELOS REHABILITADOS: PERSISTENCIA DE MORFOTIPOS E INFLUENCIA EN LA FERTILIDAD DEL SUELO

Resumen

La degradación de suelo es una problemática crítica en México, afectando la funcionalidad y equilibrio en los ecosistemas forestales. Desde este panorama, el presente estudio evalúa la persistencia de la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles en el desarrollo de coníferas y las propiedades físicas y químicas del suelo dentro de un área rehabilitada del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN). Se utilizaron ejemplares de *Pinus greggii*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii* inoculados con *Laccaria laccata*, *S. kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum*. Posterior a casi diez años de la reforestación, se llevó a cabo la caracterización morfoanatómica de las ectomicorizas persistentes, así como el análisis comparativo de propiedades físicas y químicas del suelo bajo las copas de los árboles y puntos a distancia. Los resultados sugieren la presencia continua de las estructuras fúngicas, lo que sugiere la recuperación ecológica del sitio. De las variables analizadas sólo el contenido de Magnesio mostró diferencias significativas, siendo mayor en suelos asociados a *P. oocarpa* inoculado con *L. laccata* que en suelo no inoculado. Se concluye que la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles favorece la persistencia simbiótica a largo plazo y es una gran contribución al mejorar la funcionalidad de un ecosistema degradado. Se recomienda incorporar análisis moleculares (DNA) para confirmar la identidad fúngica y profundizar en el estudio de su funcionalidad ecológica en un periodo más amplio de tiempo.

Palabras clave: Restauración de ecosistemas, caracterización morfoanatómica, hongos ectomicorrízicos comestibles.

Abstract

Soil degradation is a critical issue in Mexico, affecting the functionality and balance of forest ecosystems. Within this context, the present study evaluates the persistence of inoculation with edible ectomycorrhizal fungi on the development of conifers and the physical and chemical properties of the soil in a rehabilitated area of the Molino de Flores

Nezahualcóyotl National Park (PNMFN). Seedling samples of *Pinus greggii*, *P. oocarpa*, and *P. maximartinezii* inoculated with *Laccaria laccata*, *S. kaibabensis*, and *Hebeloma mesophaeum* were utilized. Following nearly ten years after reforestation, a morpho-anatomical characterization of the persistent ectomycorrhizae was conducted, alongside a comparative analysis of the soil's physical and chemical properties beneath tree canopies and at distant points. The results suggest the continued presence of fungal structures, indicating ecological recovery of the site. Among the variables analyzed, only Magnesium content showed significant differences, being higher in soils associated with *P. oocarpa* inoculated with *L. laccata*. It is concluded that inoculation with edible ectomycorrhizal fungi promotes long-term symbiotic persistence and constitutes a significant contribution towards enhancing the functionality of a degraded ecosystem. The incorporation of molecular (DNA) analyses is recommended to confirm fungal identity and to further investigate their ecological functionality over a more extended period.

Key words: Ecological restoration, edible ectomycorrhizal fungi, *Pinus*, degraded soils, soil fertility.

Introducción

La degradación del suelo en México es un problema significativo que afecta diversos ecosistemas forestales, impulsada principalmente por acciones humanas y, en menor medida, condiciones naturales adversas. Sus principales causas incluyen la deforestación, cambios de uso de suelo y la fragmentación paisajística, lo que ocasiona graves consecuencias como la pérdida de fertilidad y funcionalidad del suelo, erosión y el impacto en la comunidad microbiana (Flores-Rentería et al., 2020; Veldkamp et al., 2020). Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), aproximadamente el 45% de los suelos en el país presentan algún grado de degradación (Campuzano et al., 2022).

Debido a esta problemática, es indispensable implementar estrategias de rehabilitación para restaurar la funcionalidad y equilibrio de los ecosistemas. En el contexto, el uso de hongos ectomicorrízicos comestibles surge como una alternativa debido a su eficacia al promover el desarrollo y crecimiento vegetal, así como la mejora en la fertilidad el suelo.

La interacción de las raíces de las coníferas con estos hongos es una asociación simbiótica que, mediante la extensa red que forman alrededor de las raíces, facilita la absorción de nutrientes esenciales como fósforo y nitrógeno (Yan et al., 2025), aumenta la resistencia de las plantas hospedadoras a condiciones adversas que les generan estrés y mejoran la estructura del suelo (Policelli et al., 2020; Dominguez-Núñez y Abanesi, 2020). En diversos estudios demuestran que la inoculación con ectomicorrizas contribuye significativamente en la recuperación de suelos degradados, mediante rehabilitación y reforestación de ecosistemas forestales impactados por la degradación (Martínez-Reyes et al., 2018).

Adicionalmente, la caracterización morfoanatómica de las ectomicorrizas es fundamental para identificar las especies fúngicas más efectivas en la recuperación de suelos degradados. Este proceso implica la identificación y descripción de las estructuras internas y externas que se desarrollan en la interacción entre el fitobionte y el micobionte. Entre las principales características evaluadas se encuentran el tipo de ramificación, color, textura, forma, presencia de rizomorfos o cordones miceliales, abundancia del manto externo y tipo de manto (Soto-Gil et al., 2022).

El PNMFN, ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México, es un área protegida de gran valor cultural y ecológico (Hernández-López et al., 2023). Sin embargo, ha sido afectado por procesos de degradación como erosión de suelo y deforestación ocasionada por incendios forestales. Como parte de los esfuerzos de rehabilitación del sitio, en 2015 se realizó una reforestación con especies de coníferas: *Pinus greggii* Engelm., *P. oocarpa* Shiede y *P. maximartinezii* Rzedowski inoculados con hongos comestibles ectomicorrízicos de las especies *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke, *Suillus kaibabensis* Thiers y *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél.

El objetivo de este estudio fue caracterizar morfoanatómicamente las ectomicorrizas prevalecientes en los árboles inoculados para identificar especies fúngicas que contribuyan a la recuperación de suelos degradados, así como evaluar la influencia de la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles en las características físicas y químicas del suelo y el desarrollo de coníferas en un área forestal rehabilitada del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en un predio conocido como “El Jardín” con una extensión poco mayor a 2 hectáreas con coordenadas geográficas 19°30'N y 98°50'O, situada dentro del polígono del PNMFN. El parque se ubica en el municipio de Texcoco, Estado de México, México, considerado como bosque periurbano, encontrándose a una altura media de 2,300 msnm con un clima clasificado como templado subhúmedo (C(w0)(w)), el cual se caracteriza por presentar lluvias en verano, con precipitación media de entre 600 y 800 mm anuales (Hernández-López et al., 2023). El área es predominada por suelos de origen volcánico, siendo Andosoles y Regosoles los principales (INEGI, 2020), presentando señales de erosión y compactación, así mismo como la observación de tepetate en el área de estudio.

Morfología de los árboles

Para identificar gráficamente la ubicación de cada uno de los árboles, así como sus características, se empleó el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Buzai et al., 2019) para georreferenciar tanto el sitio como los individuos previamente inoculados. Esto permitió ubicar el área de estudio y los pinos inoculados, proporcionando un control preciso de la supervivencia de los árboles desde su plantación (Flores et al., 2022). De ellos se registraron además sus características morfológicas principales que incluyeron: especie, altura total (cm), altura al fuste limpio (cm), diámetro basal del tronco (cm), diámetro medio del tronco (cm), diámetros de copa de norte a sur y de este a oeste (cm), forma del tronco, color predominante del follaje y vitalidad del follaje. Los árboles georreferenciados se muestran en la Figura 1, donde se ilustran las interacciones del Fitobionte con su Micobiota correspondiente. Esta toma de datos fue realizada en julio de 2024. Mediante la combinación de herramientas de SIG y de visitas de campo se proporcionó una evaluación precisa del estado de los árboles, así como su contribución a la rehabilitación del ecosistema forestal degradado.

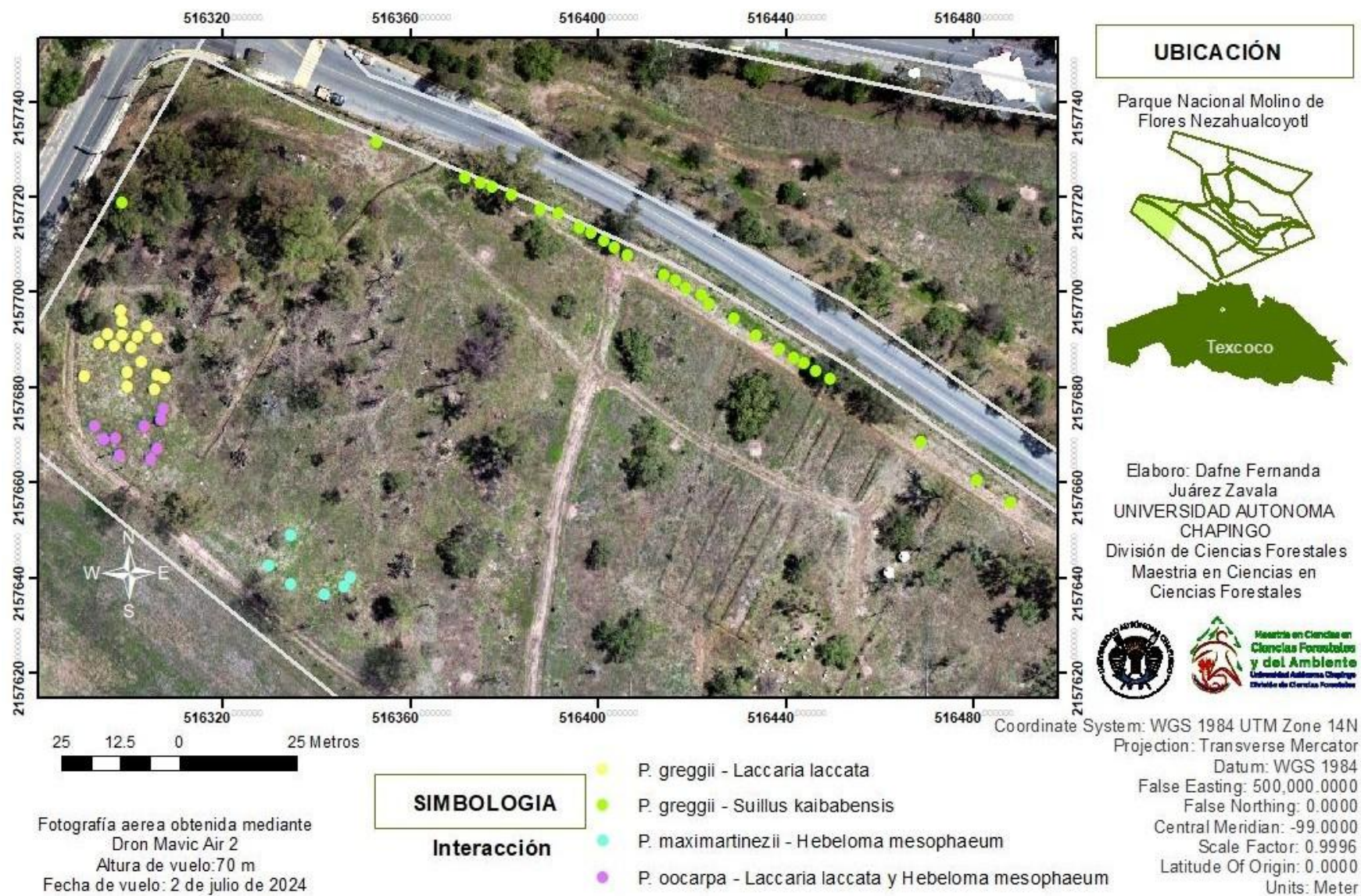


Figura 1. Árboles inoculados con ectomicorrizas según su interacción fitobiote-micobionte

Recolección de raíces ectomicorizadas

Dentro del polígono de estudio se encuentra una plantación de árboles de *P. greggii*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii*, inoculados con los hongos ectomicorrízicos comestibles *Suillus kaibabensis*, *Laccaria laccata* y *Hebeloma mesophaeum*. Para el análisis, se seleccionó al menos un árbol de cada interacción hongo-hospedero como se observa en el mapa de la Figura 2, considerando el tiempo requerido para su evaluación.



Figura 2. Puntos de muestreo enumerados considerados para la extracción de raíces ectomicorizadas

La metodología utilizada se retomó del artículo de Soto-Gil, et al. (2022). Se identificó que los árboles se encontraban por tres diferentes zonas dentro del polígono por lo que se seleccionaron tres árboles de cada zona al azar para la caracterización de las ectomicorrizas en Pinus; para ello se obtuvieron muestras de suelo extraídas mediante tubos de PVC con 20 cm de largo y 3 cm de diámetro previamente afiladas en una orilla para la mejor obtención de material. Se tomaron cuatro muestras suelo de cada uno de los árboles a su alrededor a aproximadamente tres cuartas partes de su diámetro de copa a partir del tronco por cada punto cardinal (norte, sur, este y oeste), lo anterior se observa gráficamente en la Figura 1. Al tomar las muestras de suelo con los tubos, se colocaron en aluminio para conservar su integridad al ser trasladadas. En total se colectaron treinta y seis muestras de suelo de los nueve árboles seleccionados; cabe mencionar que para obtener cada muestra por árbol se acudió a la zona debido al tiempo de vida de las ectomicorrizas.

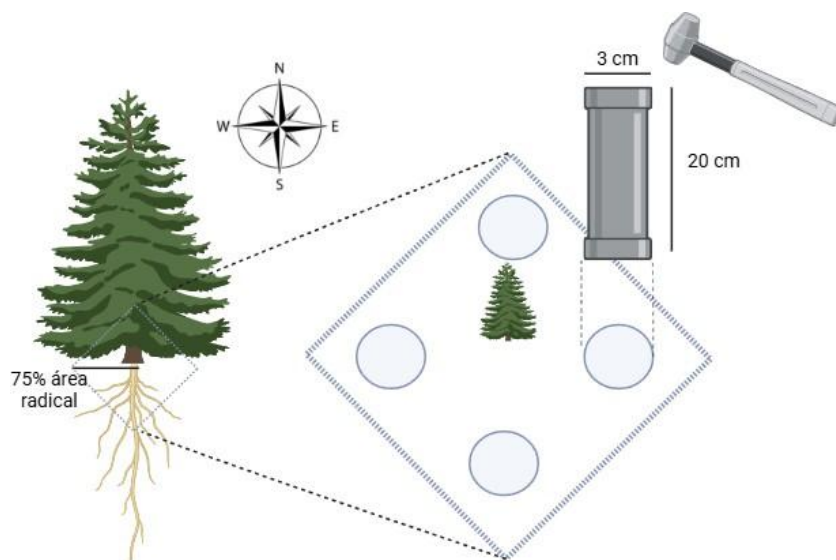


Figura 3. Proceso de extracción de muestras para obtener ectomicorrizas de los pinos
Fuente: Elaboración propia en software BioRender basado en Soto-Gil et al. (2022)

Proceso en laboratorio

Para facilitar la extracción de las raíces micorrizadas y preservar su integridad en los tubos de PVC, fueron sumergidos en agua durante 24 horas y agitadas suavemente hasta lograr su liberación total. Utilizando tamices con aberturas de 1.18 y 0.18 mm de diámetro se realizó la separación de raíces con ayuda de pinzas de precisión colocándose en cajas Petri con agua destilada para mantener las ectomicorrizas vivas.

Las raíces encontradas fueron examinadas bajo un microscopio estereoscópico para identificar y clasificar los morfotipos de ectomicorrizas asociadas a *Pinus*. Las estructuras seleccionadas fueron limpiadas cuidadosamente con un pincel fino y pinzas de precisión, fotografiándolas a un aumento de 4x y almacenadas en tubos Eppendorf de 2 mL con una solución compuesta por 70% agua y 30% alcohol.

Con el fin de analizar la estructura interna de la raíz, se realizaron cortes transversales en las raíces micorrizadas. Dichos cortes, de entre 10 y 15 μm de grosor, se obtuvieron con navajas finas para asegurar su delgadez y precisión. Posteriormente se fijaron con reactivo de Melzer en un portaobjetos para su observación en microscopio óptico a 40x de aumento.

La caracterización morfoanatómica de las raíces ectomicorrizadas se llevó a cabo utilizando claves de identificación propuestas por DEEMY, permitiendo una descripción detallada y sistemática de las estructuras a nivel macro y microscópico. Se registraron características morfológicas como tipo de puntas, estructura de la superficie del manto, presencia y disposición de rizomorfos y características del manto (Garibay-Orijel et al., 2013).

Esta caracterización facilitará la identificación de los hongos ectomicorrízicos comestibles con los que fueron realizadas las interacciones: *Pinus greggii* Engelm., *P. oocarpa* Shiede y *P. maximartinezii* Rzedowski inoculados con hongos comestibles ectomicorrízicos de las especies *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke, *Suillus kaibabensis* Thiers y *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél.

Características físicas y químicas del suelo

Se colectaron muestras de suelo correspondientes al área radical de árboles elegidos al azar dentro de los 61 localizados en la previa georreferenciación, así como las muestras

correspondientes a sus áreas equivalentes no manejadas a aproximadamente 2 metros de distancia y con ello comparar sus resultados. El muestreo se realizó en temporada húmeda. El muestreo y análisis de suelos se realizaron según los procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Debido a que la población es pequeña se consideraron muestras reducidas.

Con el objetivo de conocer si las interacciones identificadas ayudan a mejorar la calidad del suelo en áreas forestales se realizó un análisis físico químico en el suelo en el área dentro de la zona radical y su equivalente a 2 metros de distancia de la zona radical. Las pruebas realizadas fueron: pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, nitrógeno inorgánico, textura mediante el procedimiento de Bouyoucos, fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos, mediante el procedimiento de Olsen y colaboradores, fósforo extraíble para suelos neutros y ácidos mediante el método de Bray y Kurtz, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) (SEMARNAT, 2002).

Análisis estadístico

Para comparar las medianas muestrales correspondientes a las combinaciones Fitobionte-Micobionte *P. oocarpa*-*Laccaria laccata* y *Hebeloma mesophaeum* y *P. greggii*-*Suillus kaibabensis*, se realizó un análisis no paramétrico basado en el método bootstrap, ver. Efron y Tibshirani (1993) por ejemplo. Se usó tal método debido a que los tamaños de muestra son pequeños y, por ello, el supuesto de normalidad es cuestionable.

El remuestreo usó $B=1000$ muestras bootstrap y con base en éstas se calculó un intervalo de confianza no paramétrico para el parámetro $D = Me_1 - Me_2$ en el cual Me_1 y Me_2 representan las medianas teóricas de las poblaciones de valores asociados a cada una de las variables respectivas en la combinación Fitobionte-Micobionte considerada.

Cuando se considera el juego de hipótesis:

$$H_0 : D = 0 \text{ vs. } H_a : D \neq 0$$

el método bootstrap no paramétrico rechaza H_0 en favor de H_a si ocurre que el intervalo (L, U) no contiene al valor cero. En el intervalo anterior los componentes L y U corresponden a extremos inferior y superior de mismo y se obtienen a partir de la distribución empírica estimada del estadístico D obtenida mediante el remuestreo bootstrap. En el caso actual los extremos se obtuvieron usando nivel de significancia 0.05 y consideraron cuantiles muestrales $B \times 0.025$ y $B \times 0.975$.

Resultados y discusión

Variables morfoanatómicas

De los árboles identificados como ectomicorrizados con la visita de campo, se registraron variables morfológicas con el fin de evaluar su desarrollo. Los parámetros que se consideraron fueron: elevación, especie, altura total, diámetro basal, diámetro medio, diámetro de fuste, diámetro de copa, y condición de follaje. Se analizaron un total de 61 árboles inoculados y a partir de los datos obtenidos se calcularon los promedios generales para cada variable antes mencionada, así como su desviación estándar. Los resultados obtenidos se muestran de forma sintetizada en el Cuadro 1, lo que permite observar las características promedio de los árboles y así conocer sus condiciones en el área de rehabilitación. Cabe mencionar que pocas semanas antes de recolectar datos hubo un incendio forestal en el sitio y debido a ello se redujo la vitalidad de los árboles.

Cuadro 1. Valores promedio de las variables morfológicas en árboles micorrizados (n=61)

	Vivos y más del 70% vivos	Desviación estándar	Muertos y más del 70% muertos	Desviación estándar	Total	Desviación estándar
Elevación promedio (m)	2306.384	1.963	2305.372	1.254	2306.069	1.824
Altura total promedio (cm)	252.357	124.932	242.000	98.349	249.131	116.579
Diámetro promedio basal (cm)	22.238	9.824	20.316	9.678	21.639	9.740
Diámetro promedio medio (cm)	18.143	7.863	16.342	7.849	17.582	7.838
Diámetro promedio del fuste (cm)	14.869	7.354	14.342	7.555	14.705	7.358

Diámetros de copa promedio (cm)	156.250	74.205	149.658	60.189	85.230	69.960
Follaje	34 vivos, 8 + 70% vivo		14 muertos, 5+ 70% muerto		34 vivos, 8 + 70% vivo; 14 muertos, 5 +70% muertos	
Forma	33 rectos, 9 irregulares		15 rectos, 4 irregulares		13 irregulares (inclinados) y 48 rectos	

Prevalencia de ectomicorizas

Se confirmó la persistencia de los hongos ectomicorrízicos comestibles con los que fueron inoculados todos los árboles, al encontrarse estructuras típicas del hongo en al menos dos de cada tubete de PVC analizado.

En el caso de *Pinus greggi* inoculado con *Suillus kaibabensis*, mediante el análisis morfoanatómico de las raíces, en las que se encontraron estructuras típicas del hongo hospedero (Figura 4), se observó evidencia sobre una persistencia a lo largo de casi diez años de su plantación. Las raíces cortas ectomicorizadas de *S. kaibaensis* en *P. greggii* presentaron ramificación dicotómica en su estadio juvenil, evolucionando hacia una forma del tipo coraloide en su etapa madura. Su coloración es naranja en ambas fases, con una longitud de 2 mm y 0.3 mm de diámetro, siendo rectas con terminaciones cilíndricas y escaso micelio externo (Figura 4a). En su estadio maduro, adoptaron una coloración café oscuro con puntas blanquecinas transparente, con una longitud de 3 a 4 mm y 0.2 a 0.3 mm de diámetro, obteniendo una forma ligeramente sinuosa con terminaciones ligeramente afiladas, sin presencia de rizomorfos, pero con abundante micelio externo de color blanco (Figura 4b). En el corte histológico transversal de la raíz, se observan hifas emanantes poco abundantes, la red de Hartig cubriendo por completo las células corticales logrando penetrar tres capas de estas y manto externo bien desarrollado (Figura 4 c).

Esta descripción coincide con las características típicas *Suillus kaibabensis*. De acuerdo con Cardoso-Villanueva (2023), tanto la coloración y la estructura de estas ectomicorizas sugieren la persistencia del hongo hospedero en el sistema radical. Se conoce que esta especie ectomicorrízica boletal es endémica de América del Norte y presenta gran similitud con *Suillus granulatus* (Kuo, 2022). Su óptimo desarrollo en el área de estudio

confirma que se encuentra dentro de su rango ecológico natural, asociado a condiciones ambientales propicias y a un hospedero compatible. Los resultados reflejan la viabilidad de esta interacción simbiótica en condiciones de campo, incluyendo suelos degradados, además considerando que esta especie de pino esta distribuida ecológicamente en México, particularmente a las condiciones ambientales de la Sierra Madre Occidental (Martínez et al., 2020).

De acuerdo con Ruíz et al., 2021, *P. greggii* responde favorablemente a la inoculación micorrícica mejorando su crecimiento con un porcentaje de colonización entre 37% y 63%. Además, se ha demostrado que esta especie puede alcanzar una supervivencia de hasta el 89% en suelos degradados (Ortiz-Mendoza et al., 2021).

Por otro lado, *Pinus oocarpa* inoculado con *Laccaria laccata* mostró persistencia de la simbiosis tras su plantación en el mismo periodo de tiempo, siendo nuevamente observable en los análisis morfoanatómicas (Figura 4). Las raíces cortas ectomicorrizadas de *L. laccata* en *P. oocarpa* presentaron ramificación simple al encontrarse en el estadio juvenil y dicotómicas en su fase madura. Su coloración al ser juveniles varios de color ocre en la base a naranja en la zona media, con las terminaciones transparentes blancas transparentes, con una longitud de 3 mm y 0.2 mm de diámetro, siendo rectas, de terminaciones cilíndricas, sin micelio externo visible (Figura 4d). En su etapa de madura, las raíces mostraron una coloración café oscuro, con la terminación ligeramente blanca transparente, alcanzando una longitud de 4 a 5 mm y 0.3 mm de diámetro, con forma sinuosa y terminaciones cilíndricas, sin presencia de rizomorfos, pero sí cordones miceliales y escaso micelio externo de color blanco (Figura 4e). En el corte histológico transversal de la raíz, se reveló tenuemente una hifa emanante, la red de Hartig cubriendo en su totalidad las células corticales logrando penetrar tres capas de estas y manto externo (Figura 4f).

Las características observadas concuerdan con lo descrito para *L. laccata* como la ausencia de rizomorfos y la presencia de abundantes cordones miceliares (Zhang et al., 2023; Menéndez, 2016). Se sugiere que esta asociación simbiótica es estable, duradera y eficiente en el tiempo. Estudios previos ha demostrado que la inoculación con *Laccaria laccata* mejora el crecimiento y supervivencia de *P. greggii*, favoreciendo la estimulación

de la actividad microbiana de la rizosfera y promueve la abundancia de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfato (Aguirre-Zamora et al., 2021, Oliviera et al., 2021).

Así mismo, *Pinus oocarpa* inoculado con *Hebeloma mesophaeum* también evidenció la persistencia en la interacción simbiótica al ser identificado en las raíces recolectadas (Figura 4). En este caso, las raíces cortas ectomicorrizadas de *H. mesophaeum* en *P. oocarpa* mostraron ramificación simple al encontrarse en el estadio juvenil y dicotómicas en su fase madura. Su coloración en el estadio juvenil es color ocre en la base, naranja en la zona media y con las terminaciones transparentes blancas transparentes, alcanzando una longitud de 3.5 mm y 0.2 mm de diámetro, con formas sinuosas, terminaciones infladas, con escaso micelio externo y presencia de cordones miceliales (Figura 4g). En su estadio maduro, adoptaron una coloración café oscuro toda su extensión hasta las puntas, con una longitud de 4 mm y 0.3 mm de diámetro, de forma recta, sin rizomorfos y con micelio café oscuro, lo que indica madurez (Figura 4h). En el corte histológico transversal de la raíz, se identifica claramente el manto externo y la red de Hartig cubre totalmente las células corticales penetrando tres capas de células, sin hifas emanantes (Figura 4i).

Estudios previos han demostrado que la inoculación de pinos con *H. mesophaeum* mejora el crecimiento, contenido nutrimental y absorción de nutrientes de la planta. Por ejemplo, Martínez-Reyes et al. (2012) encontraron que la inoculación de esta ectomicorriza en *P. greggii* presentó incrementos significativos en diámetro, altura y biomasa, así como la mejora en la absorción de nutrientes como fosforo, nitrógeno y potasio.

Pinus oocarpa, conocido como pino cono de huevo, es una conífera de gran importancia en México, particularmente en regiones cálidas y templadas entre los 300 a 2,500 msnm (Romero-Sánchez et al., 202). Su adaptación está estrechamente vinculada a fenómenos climáticos locales (Gutiérrez-García y Ricker, 2024). Pese a que existe poca información sobre la micorrización en *Pinus oocarpa*, los resultados de este estudio evidencian la persistencia de sus asociaciones y en la resistencia ante condiciones ambientales adversas, reafirmando la funcionalidad y gran importancia de la simbiosis mutualista.

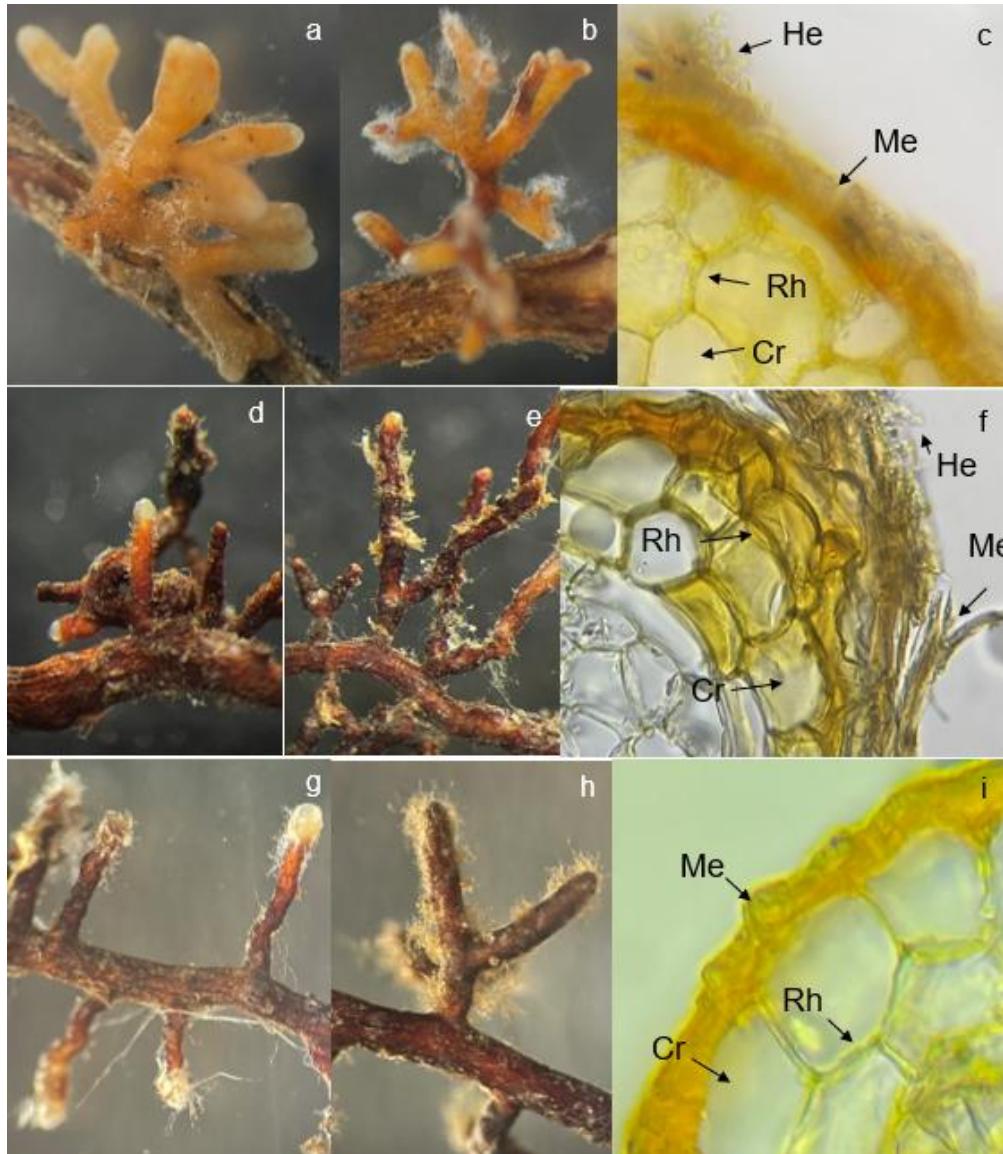


Figura 4. Características morfoanatómicas de las raíces ectomicorrizadas con los hongos ectomicorrízicos comestibles *Suillus kaibabensis* Thiers (a-c); *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke (d-f); y *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Qué. (g-i).

a) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus greggii* Engelm. inoculadas con *S. kaibabensis*. b) Estructuras morfológicas adultas de raíces de *P. greggii* inoculadas con *S. kaibabensis*. c) Corte transversal de raíz micorrizada juvenil de *P. greggii* inoculada con *S. kaibabensis*. He = Hifas emanantes, Me = Micelio externo, Rh = Red de Hartig, Cr = Células corticales (100×). d) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus oocarpa* Schiede inoculadas con *L. laccata*. e) Estructuras morfológicas adultas de raíces de *P. oocarpa* inoculadas con *L. laccata*. f) Corte transversal de raíz micorrizada adulta de *P. oocarpa* inoculada con *L. laccata*. g) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus oocarpa* Schiede inoculadas con *H. mesophaeum* h) Estructuras morfológicas

adultas de raíces de *P. oocarpa* inoculadas con *H. mesophaeum*. i) Corte transversal de raíz micorrizada juvenil de *P. oocarpa* inoculada con *H. mesophaeum*.

Lo anterior destaca la importancia de la inoculación de pinos nativos con especies ectomicorrícicas de las mismas condiciones ecológicas, ya que la implementación de estas interacciones, particularmente en la región centro de México, favorece el éxito en programas de reforestación y rehabilitación de ecosistemas, incluso en condiciones adversas como suelos degradados.

Análisis de fertilidad

En el Cuadro 2 se muestran las medianas muestrales para cada variable, en cada combinación fitobionte-micobionte, así como los extremos del intervalo no paramétrico respectivo, para la diferencia $D = Me_1 - Me_2$. También se observa cuáles diferencias entre medianas son estadísticamente diferentes de cero.

Cuadro 2. Estimaciones puntuales e intervalos de confianza no paramétricos.

Variable	Mediana muestral		Extremos del intervalo	
	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. greggii</i>	<i>L</i>	<i>U</i>
Materia orgánica	1.557	1.530	-0.268	0.366
pH	6.81	6.71	-0.06	0.55
Conductividad eléctrica	0.0002868	0.0004349	-0.00042297	0.000000847
Densidad Aparente	1.13	1.09	-0.04	0.08
N inorgánico	7.35	15.52	-17.15	4.08
Ca	1261.54	1107.74	-320.58	1530.32
Mg	692.78	377.90	59.02	654.26
Na	22	24	-8	16
K	19.4	13.7	-4.0	30.5

En el Cuadro 2 se identifica que entre ambas interacciones sólo existe una diferencia significativa en el contenido de Magnesio (Mg). Por lo anterior se concluye que la interacción *P. oocarpa* inoculado con *Laccaria laccata*, mejora las condiciones del contenido de Mg en el suelo.

Conclusiones

Se identificó que, tras casi diez años de la reforestación, los árboles de *Pinus greggii* y *P. oocarpa* inoculados con *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum* prevalecen estructuras ectomicorrícicas en sus raíces correspondientes a su inoculación, según la caracterización morfoanatómica realizada. Lo que indica la persistencia de la simbiosis ectomicorrícica en el ecosistema forestal rehabilitado y su papel en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Los resultados destacan la importancia de la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles en la rehabilitación de suelos impactados por la degradación. No obstante, es recomendable complementar estos resultados con análisis de ADN con el fin de confirmar la identidad de las especies fúngicas detectadas y con ello evaluar con mayor precisión su contribución en la recuperación de ecosistemas.

Literatura citada

- Arteaga-León, C., Pérez-Moreno, J., Espinosa-Victoria, D., Almaraz-Suárez, J. J., Silva-Rojas, H., & Delgado-Alvarado, A. (2018). Ectomycorrhizal inoculation with edible fungi increases plant growth and nutrient contents of *Pinus ayacahuite*. *Revista mexicana de biodiversidad*, 89(4), 1089-1099. 10.22201/ib.20078706e.2018.4.2235
- Agerer, R. (1995). Anatomical characteristics of identified ectomycorrhizas: An attempt towards a natural classification. En A. K. Varma & B. Hock (Eds.), *Mycorrhiza: Structure, function, molecular biology and biotechnology* (pp. 685-734). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08897-5_23
- Agerer, R., & Rambold, G. (n.d.). DEEMY - An information system for characterization and determination of ectomycorrhizae. Retrieved March 28, 2025, from <http://www.deemy.de>
- Aguirre Zamora, M., Pérez Moreno, J., López Lozano, N. E., Barragán Soriano, J. L., & Delgadillo Martínez, J. (2021). La inoculación de *Pinus greggii* con el hongo ectomicorrícico *Laccaria laccata* favorece a las comunidades nativas de

rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Biotecnia*, 23(2).
<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1302>

Buzai, G. D., Humacata, L., & Principi, N. (2019). Análisis espacial con sistemas de información geográfica. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes.
<https://www.researchgate.net/publication/298352751>

Campuzano, E. F., Briones, O., Larsen, J., Guillén Cruz, G., Fernández Luqueño, F., & Flores Rentería, D. (2022). Procedimiento para evaluar la degradación biológica del suelo en zonas áridas del noreste de México. *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, 13(1).

Cardoso Villanueva, M. D. R. (2023). Cultivo del hongo comestible *Suillus kaibabensis* Thiers. asociado con *Pinus greggii* Engelm. en campo y seguridad alimentaria.

Domínguez-Núñez, J., & Albanesi, A. (2020). Ectomycorrhizal Fungi as Biofertilizers in Forestry. *Biostimulants in Plant Science*.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.88585>.

Efron B. and Tibshirani R. J. (1993): An Introduction to the Bootstrap. Ed. Chapman-Hall, USA.

Flores Garnica, J. G. ., & Reyes Cárdenas, Óscar. (2022). Cultivo del hongo comestible *Suillus kaibabensis* Thiers. asociado con *Pinus greggii* Engelm. en campo y seguridad alimentaria.I. *Revista De Geografía Agrícola*, (69), 81–94.
<https://doi.org/10.5154/r.rga.2022.69.04>

Flores-Rentería, D., Sánchez-Gallén, I., Morales-Rojas, D., Larsen, J., & Álvarez-Sánchez, J. (2020). Changes in the Abundance and Composition of a Microbial Community Associated with Land Use Change in a Mexican Tropical Rain Forest. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1144 - 1155.
<https://doi.org/10.1007/s42729-020-00200-6>.

Garibay-Orijel, Roberto, Morales-Marañón, Emilia, Domínguez-Gutiérrez, Mario, & Flores-García, Andrés. (2013). Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los

- bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(1), 153-169. <https://doi.org/10.7550/rmb.29839>
- Gutiérrez-García, G., & Ricker, M. (2024). Climatic effects on primary and secondary growth of *Pinus oocarpa* trees in southern Mexico. *Dendrochronologia*. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126211>.
- Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., Hernández-de la Rosa, P., Mohedano-Caballero, L., & González Guillén, M. de J. (2023). Caracterización ecológica del arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 29(3), 93–108. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002>
- INEGI (2020). Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659>
- Kuo, M. (marzo de 2022). *Suillus kaibabensis*. Recuperado del sitio web MushroomExpert.Com : http://www.mushroomexpert.com/suillus_kaibabensis.html
- Martínez, A., Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-25149/v1>.
- Martínez-Reyes, M., Pérez-Moreno, J., Villarreal-Ruiz, L., Ferrera-Cerrato, R., Xoconostle-Cázares, B., Vargas-Hernández, J. J., & Honrubia-García, M. (2012). Crecimiento y contenido nutrimental de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con el hongo comestible ectomicorrízico *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2), 183-192. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.112>
- Menéndez Valderrey, J. L. (2016, marzo 21). *Laccaria laccata*. Asturnatura. Recuperado el 29 de marzo de 2025, de <https://www.asturnatura.com>

- Olivera, J. A. V., Pérez-Moreno, J., Viveros, G. S., Reyes, M. M., Castillo, G. A., Suarez, J. J. A., & Cabrera, C. R. C. (2021). Mycelial disturbance stimulates the formation of sporomes of edible ectomycorrhizal fungi associated with two neotropical pines: Micelial disturbance stimulates edible ectomycorrhizal mushrooms. *Agro Productividad*, 14(2).
- Ortiz-Mendoza, R., Aguirre-Calderón, Ó., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E., & González-Tagle, M. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca., 12. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I64.710>.
- Policelli, N., Horton, T., Hudon, A., Patterson, T., & Bhatnagar, J. (2020). Back to Roots: The Role of Ectomycorrhizal Fungi in Boreal and Temperate Forest Restoration. , 3. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00097>.
- Romero-Sánchez, M., Velasco-García, M., Pérez-Miranda, R., Velasco-Bautista, E., & González-Hernández, A. (2022). Diferentes enfoques de modelación para determinar áreas adecuadas para la conservación de árboles de pino cónico (*Pinus oocarpa* Schiede) plus en la parte central de México. *Bosques*. <https://doi.org/10.3390/f13122112>
- Ruiz, S., Ruíz, J., Rodríguez, J., Aispuro, E., & Simental, J. (2021). *Pinus greggii* ENGELM.: respuesta a la inoculación micorrízica controlada y a la fertilización en vivero. *Agrociencia*, 55, 273-290. <https://doi.org/10.47163/AGROCIENCIA.V55I3.2419>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Soto-Gil, Ana Lucila, Velázquez-Martínez, Alejandro, Pérez-Moreno, Jesús, Fierros-González, Aurelio Manuel, & Martínez-Reyes, Magdalena. (2022). Morfotipos ectomicorrícicos en retención estructural variable de *Pinus patula* Schltdl et Cham.

Madera y bosques, 28(2), e2822388. Epub 14 de abril de 2023.<https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822388>

Veldkamp, E., Schmidt, M., Powers, J., & Corre, M. (2020). Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 590- 605. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0091-5>.

Yan, X., Zhou, L., Chen, Y., Liu, R., Guo, L., Li, N., Kang, A., Zhai, K., Zhou, G., & Zhou, X. (2025). Ectomycorrhizal fungi explain more variation in rhizosphere nutrient availability than root traits in temperate forests. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105923>.

Zhang, M., Gao, X. L., Mu, L. Q., & Deng, W. Q. (2023). Morphology and molecular phylogeny reveal five new species of *Laccaria* (Hydnangiaceae, Agaricales) from Southern China. *Journal of Fungi*, 9(12), 1179. <https://doi.org/10.3390/jof9121179>

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE UN SUELO FORESTAL RESTAURADO CON PINOS ECTOMICORRIZADOS EN UN ÁREA NATURAL PROTEGIDA*

Physical and chemical characterization of a restored forest soil with ectomycorrhizal pines in a protected natural area

Dafne Fernanda Juárez-Zavala¹, Jesús Pérez-Moreno², Carlos Leopoldo Cíntora-González¹, Magdalena Martínez-Reyes², Elizabeth Hernández-Acosta^{1*}

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

²Programa Edafología. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Campus Montecillos. Km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillos. C.P. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: ehernandeza@chapingo.mx; tel.; +52 5959570126

*Corresponding autor; e-mail: ehernandeza@chapingo.mx; tel.; +52 5959570126

Resumen

Introducción. La degradación del suelo es uno de los problemas de mayor relevancia a nivel mundial. En el caso de México más del 60% de los suelos presentan algún grado de degradación. Una de las estrategias para revertirla se encuentra constituida por el establecimiento de árboles inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles.

Objetivo. Evaluar la capacidad del establecimiento de árboles inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles, 9 años después de haber sido plantados, en la restauración de suelos degradados convertidos en tepetates.

Materiales y métodos. Se evaluaron 7 características físicas y químicas de los suelos en el área de goteo de los árboles y en áreas paralelas aledañas a 50 cm de distancia de los árboles, para evaluar la influencia de los árboles en la restauración del suelo.

Resultados. Los resultados demuestran que existe un mejoramiento en las propiedades físicas y químicas del suelo como la estabilidad estructural, disponibilidad de nutrientes y equilibrio del pH, como resultado del establecimiento de los árboles ectomicorrizados.

Conclusión. La reforestación con árboles ectomicorrizados contribuye significativamente a la recuperación de suelos degradados.

Puntos destacados: La inoculación de árboles con hongos ectomicorrízicos constituye una estrategia eficaz para restaurar suelos degradados. A los nueve años, los árboles

ectomicorrizados mejoran las propiedades físico-químicas del suelo en áreas degradadas.

Palabras clave: Hongos ectomicorrízicos, rehabilitación de suelo, reforestación.

Abstract

Introduction. Soil degradation is one of the most significant problems worldwide. In Mexico, more than 60% of soils exhibit some degree of degradation. One strategy to reverse this degradation involves the establishment of trees inoculated with edible ectomycorrhizal fungi.

Objective. This study evaluated the capacity of trees inoculated with edible ectomycorrhizal fungi, established 9 years after planting, to restore degraded soils converted into tepetates (indurated volcanic layers).

Materials and methods. Seven physical and chemical characteristics of the soil were assessed within the tree drip line and in adjacent parallel areas 50 cm away from the trees, to evaluate the influence of the trees on soil restoration.

Results. The results demonstrate an improvement in the physical and chemical properties of the soil, such as structural stability, nutrient availability, and pH balance, as a result of the establishment of ectomycorrhizal trees.

Conclusion. Reforestation with ectomycorrhizal trees contributes significantly to the recovery of degraded soils.

Highlights: Inoculation of trees with ectomycorrhizal fungi is an effective strategy to restore degraded soils. At nine years, ectomycorrhizal trees improve soil physical and chemical properties in degraded areas.

Keywords: Ectomycorrhizal fungi, soil rehabilitation, reforestation.

Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) desempeñan un papel crucial como herramientas efectivas para la conservación de ecosistemas forestales degradados. Según la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), las ANP contribuyen a preservar la biodiversidad, mitigar los efectos del cambio climático y promover la adaptación de los ecosistemas (CONANP, 2020). Sin embargo, para garantizar su eficacia, es esencial desarrollar estrategias orientadas a su protección y restauración, reconociendo su importancia ecológica y su valor como legado para las generaciones futuras.

La restauración ecológica de ecosistemas forestales perturbados requiere la implementación de acciones específicas, siendo la reforestación una de las principales estrategias. Además de recuperar la cobertura vegetal, la reforestación favorece la restauración de suelos degradados al influir positivamente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En este proceso, los hongos ectomicorrízicos comestibles desempeñan un papel fundamental, ya que mejoran la capacidad de las plantas para absorber nutrientes minerales y agua del suelo (Shi et al., 2023). Asimismo, estos hongos incrementan la resistencia de las plantas a la sequía y contribuyen a su desarrollo en condiciones de estrés abiótico (Aguirre-Zamora et al., 2021).

El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN), ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México, es un área natural protegida valorada por su cultura y naturaleza (Hernández-López et al., 2023). Sin embargo, presenta impactos ambientales como la deforestación y la erosión del suelo (INEGI, 2020). Por esta razón, en el año 2015 se reforestó con especies de *Pinus greggii* Engelm., *P. oocarpa* Shiede y *P. maximartinezii* Rzedowski inoculados con hongos comestibles ectomicorrízicos de las especies *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke, *Suillus kaibabensis* Thiers y *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél.

La caracterización del suelo en áreas reforestadas con pinos inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles es fundamental para evaluar los cambios en sus propiedades a lo largo del tiempo. Este análisis permite determinar la influencia de la reforestación en la fertilidad del suelo, su capacidad de retención de humedad y su estabilidad estructural, indicadores del éxito de los programas de restauración ecológica.

En este sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo en el área reforestada, nueve años después de la reforestación, con el propósito de evaluar el impacto de esta práctica en la recuperación del suelo, como una práctica eficaz dentro del proceso de la restauración ecológica.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio es un polígono que sitúa dentro del PNMFN, abarca una superficie de aproximadamente 2.1 hectáreas, sus coordenadas geográficas son 19°30'N y 98°50'O. El parque se considera un bosque periurbano situado en el municipio de Texcoco, Estado de México, con una altitud media de 2,300 m (Hernández-López et al., 2023).

Los suelos predominantes son de origen volcánico, principalmente Andosoles y Regosoles, los cuales presentan signos de compactación y erosión (INEGI, 2020). En el área de estudio, se observó la presencia de tepetate.

En cuanto al clima, se clasifica como templado subhúmedo (C(w0)(w)), con lluvias en verano, una temperatura media anual entre 14 y 18°C, y una precipitación entre 600 y 800 mm anuales (Hernández-López et al., 2023).

Muestreo de suelo y preparación de las muestras

El muestreo de suelo se llevó a cabo en agosto de 2024, coincidiendo con la temporada de lluvias, cuando la cobertura vegetal alcanzaba su máximo desarrollo. Se recolectaron muestras del sistema radical de 25 árboles micorrizados seleccionados aleatoriamente entre 61 ejemplares previamente georreferenciados. Adicionalmente, se obtuvieron muestras de suelo a una distancia de 2 metros de cada árbol seleccionado (suelos a distancia), con el propósito de comparar las propiedades físicas y químicas entre el suelo directamente asociado al sistema radical y el suelo circundante no influenciado por la micorrización.

En total se obtuvieron 50 muestras, las cuales fueron sometidas a análisis. La Figura 1 ilustra la ubicación geográfica de los puntos de muestreo, obtenida con un dron Mavic Air 2 a una altura de 70 metros.

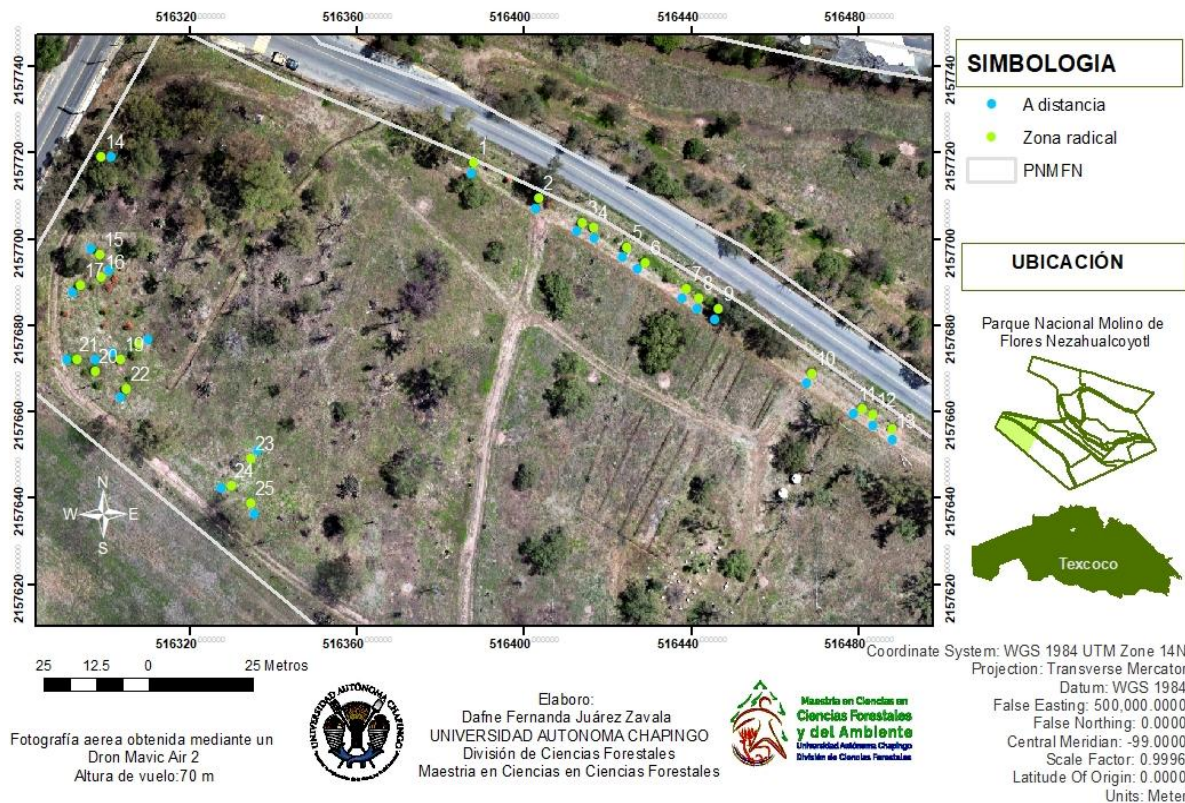


Figura 1. Puntos de muestreo en suelos del sistema radical de árboles micorrizados y sus equivalentes (suelos a distancia).

Las muestras de suelo se trasladaron al laboratorio para su proceso de secado y tamizado, y se sometieron a los análisis de laboratorio. En cada muestra se determinaron las siguientes propiedades: pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, nitrógeno inorgánico (N_i), textura (mediante el procedimiento de Bouyoucos), fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos (según el procedimiento de Olsen y colaboradores) y fósforo extraíble para suelos neutros y ácidos (usando el método de Bray y Kurtz). Todos los análisis se realizaron conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Análisis de los datos

Para el análisis estadístico de los datos, primero se identificaron las variables a comparar entre las dos condiciones de suelo: del sistema radical de árboles micorrizados y suelos a distancia. El objetivo fue evaluar las diferencias en los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio para cada una de las siete variables de suelo analizadas. Posteriormente, mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon para rangos con signo

y muestras pareadas (Tonggumnead, 2021; Marius y Ogwah, 2024) se probó si la mediana de la diferencia de las variables respuesta de las determinaciones físicas y químicas por árbol correspondientes a las dos condiciones de suelo (del sistema radical de árboles micorrizados y suelos a distancia) pueden considerarse estadísticamente igual que cero. La prueba se aplicó a la diferencia de respuestas para cada una de las variables, considerando las dos condiciones de suelo, y un nivel de significancia de 0.05. Esta prueba permite comparar las medianas de dos grupos relacionados, como se requiere en este estudio, sin que deba existir normalidad en la variable respuesta ni homogeneidad de varianzas entre el par de muestras consideradas. Un valor-p, nivel de significancia estimado, menor que 0.05, indica una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos examinados. El análisis se realizó utilizando el software estadístico SAS 9.4 (SAS Institute Inc., 2020).

Resultados y discusión

Los resultados de los análisis en laboratorio muestran datos diferenciados entre los suelos del sistema radical de árboles micorrizados (Cuadro 1) y los suelos a distancia (Cuadro 2). La comparación entre ambos cuadros permite identificar diferencias para determinar si las ectomicorrizas contribuyen a mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de suelos del sistema radical de árboles micorrizados

Fitobionte	Micobiote	Textura	Densidad aparente (g/cm ³)	Conductividad eléctrica ds m ⁻¹	Materia orgánica (%)	pH	Nitrógeno inorgánico (ppm)	Fósforo según pH (mg ⁻¹)
1. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	0.91	0.00058759	2.130	6.63	15.52	20.53*
2. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	0.94	0.00087376	1.875	6.64	22.05	19.99*
3. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.11	0.00029125	1.644	6.69	13.88	15.96*
4. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.15	0.00014563	1.530	6.80	17.15	18.36*
5. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.09	0.00028998	1.471	6.69	12.25	18.03*
6. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.07	0.00028871	1.557	6.74	10.62	17.08*
7. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.11	0.00086826	1.463	6.78	15.52	21.68*
8. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.16	0.00028998	1.521	6.68	15.52	12.95*
9. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.13	0.00043582	1.431	6.71	20.42	11.63*
10. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.17	0.00057997	1.521	6.68	20.42	19.41*
11. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.09	0.00071296	1.496	6.80	13.88	19.21*
12. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.13	0.00036089	1.487	6.80	28.58	12.84*
13. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.12	0.00057884	1.439	6.79	12.25	14.27*
14. <i>P. greggii</i>	<i>Suillus kaibabensis</i>	Franco arenosa	1.03	0.00079901	2.165	6.55	26.95	23.31*
15. <i>P. greggii</i>	<i>Laccaria laccata</i>	Franco arenosa	1.06	0.00043498	1.594	6.80	18.78	21.14*
16. <i>P. greggii</i>	<i>Laccaria laccata</i>	Franco arenosa	0.94	0.00021601	2.219	6.65	23.68	20.46*
17. <i>P. greggii</i>	<i>Laccaria laccata</i>	Franco arenosa	1.05	0.00028942	2.237	6.87	14.70	25.82*
18. <i>P. oocarpa</i>	<i>Laccaria laccata</i> y <i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.10	0.00028998	1.862	6.75	19.60	21.55*
19. <i>P. oocarpa</i>	<i>Laccaria laccata</i> y <i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.16	0.00043582	1.539	6.68	17.15	16.54*
20. <i>P. oocarpa</i>	<i>Laccaria laccata</i> y <i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.13	0.00014499	1.487	6.81	7.35	18.16*
21. <i>P. oocarpa</i>	<i>Laccaria laccata</i> y <i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.07	0.00028405	1.875	7.00	ND	22.77 ^{&}

22.	<i>P. oocarpa</i>	<i>Laccaria laccata</i> y <i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.13	0.00028688	1.557	7.26	4.90	14.10 ^{&}
23.	<i>P. maximartinezii</i>	<i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.09	0.00028801	1.548	7.44	4.90	12.81 ^{&}
24.	<i>P. maximartinezii</i>	<i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.05	0.00028801	1.566	7.11	17.15	11.69 ^{&}
25.	<i>P. maximartinezii</i>	<i>Hebeloma mesophaeum</i>	Franco arenosa	1.07	0.00028801	1.644	7.37	17.15	18.97 ^{&}

ND. No detectado, * obtenido por el método Bray, [&] Obtenido por el método Olsen

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de suelos a distancia del árbol micorrizado.

Árbol**	Textura	Densidad aparente (g/cm ³)	Conductividad eléctrica ds m ⁻¹	Materia orgánica (%)	pH	Nitrógeno inorgánico (ppm)	Fósforo según pH (mg ⁻¹)
1	Franco arenosa	1.13	0.00098431	1.463	7.06	12.25	9.49 ^{&}
2	Franco arenosa	1.11	0.00085047	1.849	6.87	12.25	13.96*
3	Areno francosa	1.03	0.00071296	1.644	6.91	9.80	19.41*
4	Franco arenosa	1.21	0.00056924	1.566	6.98	12.25	14.67*
5	Areno francosa	1.27	0.00028518	1.447	6.95	2.45	13.93*
6	Franco arenosa	1.14	0.00028236	1.548	6.82	14.70	15.35*
7	Franca arenosa	1.18	0.00028518	1.644	6.21	12.25	28.93*
8	Franco arenosa	1.09	0.00028631	1.624	6.71	7.35	14.10*
9	Franco arenosa	1.14	0.00021473	1.585	6.76	14.70	12.81*
10	Franco arenosa	1.11	0.00028575	1.530	6.49	4.90	23.04*
11	Franco arenosa	1.14	0.00021219	1.548	6.58	14.70	30.42*
12	Franco arenosa	1.14	0.00014287	1.585	6.82	7.35	11.93*
13	Franco arenosa	1.21	0.00028688	1.624	6.69	4.90	17.52*
14	Franco arenosa	1.09	0.00136267	1.752	6.88	9.80	16.37*
15	Franco arenosa	0.97	0.00071296	1.664	6.79	9.80	12.17*
16	Franco arenosa	1.05	0.00098431	2.048	6.79	7.35	25.82*
17	Franco arenosa	0.87	0.00057037	2.336	6.59	9.80	23.04*
18	Franco arenosa	0.92	0.00114525	1.987	6.57	2.45	13.59*
19	Franco arenosa	0.96	0.00064547	2.017	6.55	9.80	12.84*
20	Franco arenosa	0.94	0.00085555	2.017	6.79	4.90	16.57*
21	Franco arenosa	1.02	0.00175769	1.624	6.61	2.45	14.27*
22	Franco arenosa	0.99	0.00070872	1.775	6.41	9.80	13.73*
23	Franco arenosa	0.98	0.00028462	1.752	6.58	17.15	12.81*
24	Franco arenosa	1.09	0.00100012	1.566	6.58	9.80	11.35*
25	Franco arenosa	1.04	0.00028518	1.824	6.48	7.35	14.23*

ND. No detectado, * obtenido por el método Bray, & Obtenido por el método Olsen** los fitobiontes y micobiontes corresponden a los señalados en el Cuadro 1.

La textura de los suelos del sistema radical de árboles micorrizados fue franco arenosa, mientras que en los suelos colectados a distancia se identificaron tres tipos de textura: franco arenosa, areno francosa y franca. La textura franco arenosa en el sistema radical indica una mayor proporción de arena y una cantidad moderada de limo y arcilla, lo que favorece el drenaje y la aireación del suelo (Li et al., 2021). La variabilidad textural en los suelos colectados a distancia refleja una mayor heterogeneidad en la composición granulométrica. Esta variabilidad podría estar influenciada por la vegetación circundante (Jiang et al., 2020), cuya abundancia en la zona de estudio aumenta durante la temporada de lluvias.

Los resultados de la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon indicaron diferencias significativas en la concentración de N_i ($p=0.0002$), una de las siete variables analizadas, entre suelos del sistema radical de árboles micorrizados y los suelos colectados a distancia (Cuadro 3).

Cuadro 3. Medianas y comparación estadística de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante la prueba de Wilcoxon

			Medianas		Estadístico de Wilcoxon	p-value
			Suelos del sistema radical de árboles micorrizados	Suelos a distancia del árbol micorrizado		
Nitrógeno inorgánico (N_i) (ppm)			15.5167	9.8000	123.5000	0.0002
Conductividad eléctrica $ds\ m^{-1}$			0.0003	0.0006	-61.5000	0.0986
pH			6.7800	6.7100	43.0000	0.2553
Densidad aparente (g/cm^3)			1.0939	1.0880	16.0000	0.0676
Fósforo según pH (mg^{-1})			18.3650	14.2335	52.0000	0.1406
Materia orgánica (%)			1.5570	1.6435	-54.5000	0.0980

El contenido de N_i en los suelos del sistema radical de árboles micorrizados varió de 4.90 a 26.95 $mg\ Kg^{-1}$. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, estos valores corresponden a las clases muy bajo a medio. En contraste, en los suelos colectados a distancia, los valores oscilaron entre 2.45 y 17.15 $mg\ Kg^{-1}$, correspondientes a las clases muy bajo a bajo. Esta diferencia sugiere que la interacción con el árbol micorrizado

favorece una mayor disponibilidad de N_i en el suelo cercano a las raíces (Hawkins & Robbins, 2022).

Policelli et al. (2020) demostraron que los árboles inoculados con ectomicorizas en bosques templados y boreales mejoran su supervivencia al tolerar las condiciones ambientales adversas, como la degradación del suelo, al optimizar la absorción de nutrientes, incluido el nitrógeno, en el sistema radical. En los bosques, la movilización de este elemento del suelo por parte de los hongos ectomicorrízicos comestibles favorece el crecimiento de los árboles (Mahmood et al., 2024). Por otro lado, Van Der Heijden et al. (2015), indicaron que hasta un 80% del nitrógeno que las plantas absorben del suelo proviene de los hongos micorrízicos, lo cual permite que muchas especies vegetales puedan crecer y sobrevivir en los suelos.

El pH en los suelos del sistema radical de árboles micorrizados presentó valores que oscilaron entre 6.55 y 7.44, clasificándose como moderadamente ácidos a medianamente alcalinos, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. En contraste, los suelos colectados a distancia presentaron valores de pH entre 6.21 y 7.06, clasificados como moderadamente ácidos a neutros.

Las diferencias en los valores de pH en los suelos del sistema radical de árboles micorrizados, puede estar relacionadas con la influencia que tiene la micorriza en la rizosfera. Van Der Heijden et al. (2015) mencionan que las asociaciones micorrízicas pueden modificar el pH del suelo a través de la absorción de cationes y la liberación de protones (H^+), lo que influye en la acidez o alcalinidad del suelo. Estos resultados sugieren que la ectomicorriza puede participar en la regulación del pH del suelo.

En el caso de los suelos a distancia, se registró un pH generalmente neutro (Cuadro 2). Este resultado pudo estar influenciado por tres incendios forestales de alta intensidad ocurridos en el área de estudio entre los años 2016 y 2024, así como por la vegetación y el muestreo realizado durante la temporada de lluvias. Al respecto, Capulín et al. (2010) encontraron que, en suelos forestales afectados por incendios, el pH se incrementó debido a la aportación de cenizas y bases cambiables, provenientes del material orgánico calcinado, compuesto por árboles, arbustos y pastos.

La densidad aparente en los suelos del sistema radical de árboles micorrizados presentó valores entre 0.91 y 1.17 g cm⁻³ (media: 1.08 g cm⁻³), lo que sugiere una estructura más suelta, favorecida por la actividad en la raíz y la materia orgánica (Weil & Brady, 2016). En contraste, en los suelos colectados a distancia, la densidad aparente varió entre 0.87 y 1.27 g cm⁻³ (media: 1.07 g cm⁻³), mostrando mayor variabilidad y puntos de mayor compactación. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, los valores obtenidos indican que algunos corresponden a suelos orgánicos y volcánicos (menores de 1.00 g cm⁻³), mientras que otros presentan densidades propias de suelos francosos.

Las concentraciones de fósforo en suelos del sistema radical de árboles micorrizados variaron de 11.63 a 25.82 mg Kg⁻¹, clasificándose en el rango de bajo a medio según la NOM-021-SEMARNAT-2000. Por otro lado, los suelos a distancia presentaron valores que oscilaron entre 9.49 y 30.42 mg Kg⁻¹, con un rango desde bajo a alto según la normativa. Aunque no se encontraron diferencias significativas estadísticamente entre ambos grupos ($\alpha = 0.05$), los suelos micorrizados presentaron menor variabilidad, lo que sugiere mayor estabilidad en la disponibilidad de fósforo de la rizosfera.

Lo anterior sugiere que la micorrización contribuye a la mejora de la fertilidad del suelo, optimizando la absorción de fósforo en las raíces, lo que a su vez favorecería la estabilidad del sistema radical y la disponibilidad de dicho nutriente; debido a que los hongos ectomicorrízicos secretan distintas enzimas de fósforo que son fundamentales en la movilización y solubilización del elemento en el suelo (Müller et al., 2020). Estas mismas descomponen compuestos orgánicos y liberan fósforo disponible (Meeds et al., 2021). La concentración de fósforo extraíble en los suelos del sistema radical de árboles micorrizados es favorable para los procesos esenciales que ocurren en los ecosistemas, por ejemplo, la fotosíntesis, el desarrollo de raíces, floración y funcionamiento de comunidades bacterianas (Oliverio et al., 2020).

Considerando los dos tipos de suelo, la prueba no paramétrica de Wilcoxon no mostró diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) entre las medianas de las variables conductividad eléctrica, pH, densidad aparente, fósforo según pH y materia orgánica. Sin embargo, las medianas de pH, densidad aparente y fósforo se encuentran dentro del

rango correspondiente al suelo del sistema radical de árboles micorrizados, lo que sugiere que la presencia de ectomicorrizas favorece estas propiedades del suelo (Figura 2).

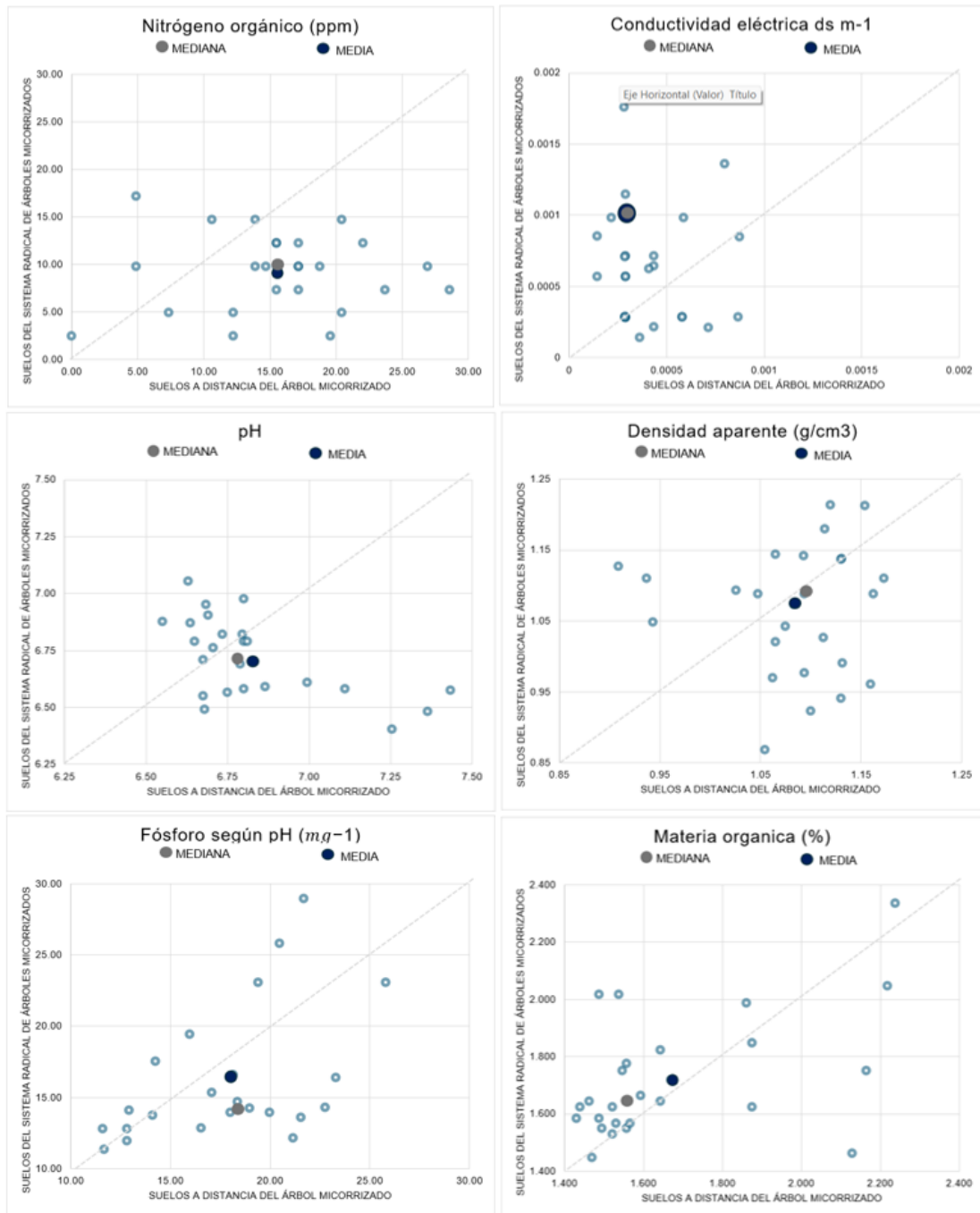


Figura 2. Propiedades físicas y químicas y sus medianas correspondientes en suelos del sistema radical de árboles micorrizados y suelos a distancia

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran la importancia de la reforestación con árboles ectomicorrizados como una estrategia efectiva para la recuperación de suelos degradados en un área natural protegida, resaltando su papel en la estabilidad estructural, la disponibilidad de nutrientes y la regulación del pH del suelo. Las ectomicorrizas al facilitar la absorción y movilización de fósforo, el cual es un elemento fundamental en la fertilidad del suelo.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflicto de interés.

Literatura citada

- Aguirre-Zamora, M., Pérez-Moreno, J., López-Lozano, N. E., Barragán Soriano, J. L., & Delgadillo-Martínez, J. (2021). La inoculación de *Pinus greggii* con el hongo ectomicorrícico *Laccaria laccata* favorece a las comunidades nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Biotecnia*, 23(2), 5-10. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1302>
- Capulín Grande, Juan, Mohedano Caballero, Leopoldo, & Razo Zarate, Ramón. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 79-87. Recuperado en 30 de enero de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000100009 & lng=es&tlng=es.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), 2025. Ficha Molino de Flores Netzahualcóyotl. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=103®=7>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (conanp). (2020). *Resiliencia Áreas Naturales Protegidas: Soluciones naturales a retos globales*. CONANP. https://www.conanp.gob.mx/ProyectoResiliencia/ResilienciaANP_SolucionesNaturalesARetosGlobales.pdf

- Hawkins, B. J., & Robbins, S. (2022). Comparison of ammonium, nitrate, and proton fluxes in mycorrhizal and nonmycorrhizal roots of lodgepole pine in contrasting nitrogen treatments. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(9), 1245-1253. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0066>
- Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., Hernández-de la Rosa, P., Mohedano-Caballero, L., & González Guillén, M. de J. (2023). Caracterización ecológica del arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 29(3), 93–108. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002>
- INEGI (2020). Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659>
- Jiang, P., Ding, W., Yuan, Y., & Ye, W. (2020). Diverse response of vegetation growth to multi-time-scale drought under different soil textures in China's pastoral areas. *Journal of Environmental Management*, 274, 110992. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110992>
- Li, Y., Li, M., Liu, H., & Qin, W. (2021). Influence of soil texture on the process of subsurface drainage in saturated-unsaturated zones. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 82-89. <https://DOI:10.25165/j.ijabe.20211401.5699>
- Marius, O., & Ogwah, E. (2024). Predicting fertility status by adjusting for ties in a matched sampled population in ebonyi state using median test. *International Journal of Medical Science and Dental Health*. <https://doi.org/10.55640/ijmsdh-10-11-08>.
- Meeds, J. A., Kranabetter, J. M., Zigg, I., Dunn, D., Miros, F., Shipley, P., & Jones, M. D. (2021). Phosphorus deficiencies invoke optimal allocation of exoenzymes by ectomycorrhizas. *The ISME Journal*, 15(5), 1478-1489. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00864-z>

- Mahmood, S., Fahad, Z., Bolou-Bi, E. B., King, K., Köhler, S. J., Bishop, K., ... & Finlay, R. D. (2024). Ectomycorrhizal fungi integrate nitrogen mobilisation and mineral weathering in boreal forest soil. *New Phytologist*, 242(4), 1545-1560. <https://doi.org/10.1111/nph.19260>.
- Müller, K., Kubsch, N., Marhan, S., Mayer-Gruner, P., Nassal, P., Schneider, D., Daniel, R., Piepho, H., Polle, A., & Kandeler, E. (2020). Saprotrophic and Ectomycorrhizal Fungi Contribute Differentially to Organic P Mobilization in Beech-Dominated Forest Ecosystems. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 47. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00047>.
- Oliverio, A. M., Bissett, A., McGuire, K., Saltonstall, K., Turner, B. L., & Fierer, N. (2020). The role of phosphorus limitation in shaping soil bacterial communities and their metabolic capabilities. *MBio*, 11(5), 10-1128. <https://doi.org/10.1128/mbio.01718-20>
- Policelli, N., Horton, T. R., Hudon, A. T., Patterson, T. R., & Bhatnagar, J. M. (2020). Back to roots: The role of ectomycorrhizal fungi in boreal and temperate forest restoration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 97. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00097>
- SAS Institute Inc. (2020). SAS® 9.4 y versiones anteriores: Soporte y políticas de servicio. Recuperado el 28 de enero de 2025, de <https://support.sas.com/es/technical-support/services-policies/sas-94-earlier.html>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Shi, J., Wang, X., & Wang, E. (2023). Mycorrhizal Symbiosis in Plant Growth and Stress Adaptation: From Genes to Ecosystems. *Annual review of plant biology*, 74, 569–607. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-061722-090342>

Tonggumnead, U. (2021). A comparative study on the efficiency of test statistics in testing the differences between two dependent datasets. *International Journal of Applied Mathematics*. <https://doi.org/10.12732/IJAM.V34I1.2>.

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). The nature and properties of soils, 15th edn., edited by: Fox, D. PEARSON, USA.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES

La implementación del modelo PER demostró su valía como herramienta metodológica para el diagnóstico integral de ecosistemas forestales sometidos a impactos ambientales. Su aplicación permitió identificar un ecosistema expuesto a diversas presiones humanas y naturales, pero que conserva una biodiversidad resiliente y con una gestión alentadora ante su conservación. Este enfoque facilitó el análisis de las relaciones entre los factores de estrés, el estado del ecosistema y las respuestas de manejo, aportando un marco conceptual robusto del ANP. No obstante, la disponibilidad limitada de recursos económicos representa un desafío para las autoridades del parque.

Los resultados indican que la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles establece una simbiosis activa y persistente en condiciones de campo. Tras nueve años y seis meses desde la plantación, la persistencia de morfotipos ectomicorrízicos, evaluados mediante caracterización morfoanatómica, confirmó la viabilidad a largo plazo de esta biotecnología como estrategia de restauración. Particularmente, se detectó que en *Pinus greggii* y *P. oocarpa* inoculados con *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum*, pervivieron morfotipos característicos morfoanatómicamente correspondientes a sus respectivas inoculaciones, mostrando la continuidad de la simbiosis en el ecosistema rehabilitado.

Así mismo, la reforestación con árboles ectomicorrizados adaptados a las condiciones ambientales locales generó mejoras cuantificables en las propiedades físicas y químicas de suelos degradados. El aumento en la estabilidad de la estructural y disponibilidad de nutrientes esenciales, especialmente nitrógeno orgánico y magnesio, demuestran el potencial de esta biotecnología para revertir la degradación edáfica y mejorar la funcionalidad ecosistémica. La facilitación de la absorción y movilización de nutrientes, resultado del intercambio nutrimental con las ectomicorrizas, contribuyó significativamente a la recuperación del suelo, lo que es auxiliar en el restablecimiento de condiciones propicias para la regeneración ecológica.

Los hallazgos subrayan la importancia de establecer programas de monitoreo a largo plazo, incorporando análisis moleculares para confirmar las identidades fúngicas

persistentes. El éxito de las acciones de conservación queda estrechamente relacionado a la continuidad de las estrategias implementadas y el fortalecimiento de programas de educación ambiental. En conjunto, esta investigación aporta evidencia científica que respalda el uso de la simbiosis ectomicorrízica como una herramienta para mitigar los impactos ambientales ejercidos en los bosques y promover su recuperación funcional.

ANEXOS

1. ENTREVISTA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PNMFN MEDIANTE EL MODELO PRESIÓN-ESTADO-RESPUESTA

Nombre del entrevistado(a): **Agustín Tagle Urrutia**

Cargo: **Director encargado**

Institución: **Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas**

Fecha: **Mayo 2025**

Nombre del entrevistador(a): **Dafne Fernanda Juárez Zavala**

Objetivo de la entrevista: Recabar información clave con el director encargado del PNMFN sobre el estado actual del ecosistema forestal, las presiones que enfrenta y las acciones de respuesta implementadas en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, como parte de la aplicación del modelo Presión-Estado-Respuesta para la identificación de impactos ambientales.

SECCIÓN 1: ESTADO DEL ECOSISTEMA (ESTADO)

- ¿Cuáles son los principales indicadores que utilizan para evaluar el estado de conservación del ecosistema forestal (cobertura, regeneración, biodiversidad, etc.)?

Utilizamos en la parte ambiental varios de alguna manera. Uno de ellos es la tasa de sobrevivencia de reforestaciones, que hemos tenido dos cobertura y sanidad de los árboles y estamos en el caso de fauna y flora, hacemos monitoreos constantes e inventarios de identificación.

- ¿Qué metodologías emplean para monitorear el crecimiento, supervivencia y sanidad de los árboles reforestados? ¿Utilizan tecnologías de monitoreo remoto o participativo?

Bueno el parque por ser federal no utilizamos tanto los participativos porque no tenemos localidades aquí adentro. Nosotros somos los dueños y poseedores del recurso, entonces no hay gente que se meta y los usuarios como los comerciantes, ellos no les interesa meterse en esto. Entonces en ese sentido no, no tenemos como tal un monitoreo participativo.

Pero sí trabajamos en la parte metodológica. Sobre todo, utilizamos las herramientas de monitoreo que propone la misma Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Es con lo que nos regimos y quienes aplican los monitoreos son la Brigada, la Brigada de Vigilancia y Monitoreo Comunitario que ella basa todo su trabajo en los protocolos de monitoreo que desarrolló la misma CONANP y que además están dados para ecosistemas.

- ¿Han observado cambios significativos en la salud del bosque desde que iniciaron los programas de reforestación? ¿Cómo los documentan?

Desde que iniciamos las reforestaciones lo que hemos visto es el inadecuado uso de especies para reforestar. Empezamos con lo clásico y tradicional que todo el mundo te da, pino, pero no es una zona de pino. Hemos recibido pláticas de profesionistas de instituciones académicas y en ellas se nos explicaba que parte del problema es que no tenemos los hongos adecuados para eso. Y bueno, por estudios que se tienen y revisiones de bibliografía, no necesariamente eran terrenos forestales y además, con la llegada de los españoles se sufre un gran cambio de uso de suelo en donde empiezan a predominar los suelos con un uso agrícola. Entonces estamos hablando de campos sobre todo de trigo y maíz. Por eso entonces en la hacienda molinera de aquí de molino de flores, no nos funciona en ese sentido pensar que, si tendríamos una vegetación totalmente de bosque o forestal, pero las condiciones de clima también nos llevan a pensar que no son las condiciones de tener bosque, ya que son climas más bien secos, es de matorral xerófilo. Entonces hoy en día lo que estamos haciendo es impulsar que nuestras campañas de reforestación vayan con especies más adecuadas a estos climas secos. Por lo menos en las partes altas. Podremos tener algunos casos exitosos de pino, pero no necesariamente es porque aquí había pino, sino porque estamos generando las condiciones más adecuadas.

Y por ejemplo *Pinus oocarpa* y *greggii*. Si son pinos que se pueden llegar a utilizar, pero no son necesariamente en realidad los pinos nativos de aquí del terreno de la región. De hecho, yo discuto mucho, sí, 100 metros altitudinales más arriba te va a pegar todos los pinos, todos los encinos, pero en esta parte no. Nosotros estamos en una zona de transición, si son condiciones distintas de suelo y climáticas, mismas que influyen mucho en el suelo. Tenemos climas secos que obviamente no te permiten desarrollar un suelo, como en las partes altas, que sí hay mucha más humedad. Entonces eso y si además le agregas la parte agrícola, va a ser difícil. Por lo tanto, ahorita lo que estamos trabajando es más bien xerófilas algunas cactáceas para empezar a meter y algunas plantas que sean resistentes. Puede ser el palo dulce, el huizache, el mezquite y además eran especies que predominaban aquí, que fueron erradicadas para volver los campos de cultivo. Entonces un poco en ese sentido, pensamos que, de manera a futuro, como vegetación secundaria, empezamos a tener una mayor presencia de otro tipo de especies, árboles ya más desarrollados. Igual puede ser que sí, ya empieza pino, *oocarpa*, pero ya va a ser como parte de un proceso más natural. O los encinos tenemos encinos en las partes más húmedas, lógicamente. Pero si empezamos a incrementar estas zonas de humedad, podremos ir extendiendo nuestra mancha de bosques.

Sí hay caso de éxito, pero son porque tienen condiciones muy especiales. Digo, la maestra Magda los viene a regar, se les ha protegido de incendios, se les puso micorrizas y por lo que me platicó se gastó una buena cantidad monetaria en ese sentido. Entonces, Pues sí, los proyectos piloto son muy exitosos porque le inviertes todo cuando los quieres reproducir es cuando no funciona.

SECCIÓN 2: CONDICIÓN DEL SUELO (ESTADO/PRESIÓN)

- ¿Evalúan la calidad y fertilidad del suelo en las áreas reforestadas o rehabilitadas? ¿Qué parámetros analizan regularmente? ¿Se integran estos datos en la toma de decisiones de manejo?

En realidad, no, se han hecho algunos análisis de suelo, pero no se hacen de manera continua por falta de recursos básicamente. Dependemos mucho de trabajos de instituciones externas, por ejemplo, vino la UAM y también nos presentó algunas cosas interesantes del suelo, pero fue

a nivel de práctica escolar entonces los resultados son tan fundamentados científicamente ni tan ricos. Y aquí en la CONANP no tenemos laboratorios o recursos destinados para ese tipo de estudios entonces eso es lo que nos limita mucho.

En cuanto a la toma de decisiones, nos ayudan, pero no son fundamentales porque sé que se han hecho a lo largo del tiempo entonces más o menos nos vamos, sí hemos tratado de que cuando vienen a hacer estudios por ejemplo de otras universidades ir eligiendo sitios distintos para ir haciendo estas comparaciones, pero más en el ánimo de comparación por si requieren en un momento dado la reforestación.

- ¿Cuáles son las principales causas identificadas de erosión o compactación (degradación) del suelo en el parque? ¿Existen zonas críticas mapeadas y cómo se priorizan las acciones en ellas?

Curiosamente el parque es muy estable, o sea, tenemos algunas zonas de acumulación pegadas al río, las zonas de erosión son mínimas en realidad, tanto de erosión hídrica, como de eólica, la erosión eólica en la parte de las lomas sería las más fuertes y porque no tenemos mucha vegetación, sin embargo, tampoco es un problema que hayamos detectado como grave. Los resultados que tenemos ahí me llevan a pensar que tenemos como procesos naturales obviamente se va a erosionar en un lado, pero tendrá acumulación en el otro. Tenemos un poquito más de erosión en las partes altas pero donde tenemos los suelos menos desarrollados, tenemos incluso afloramientos rocosos entonces ahí no hay problema, a lo largo sí tendremos algunas cuestiones de erosión pero precisamente donde cambia la pendiente y si abre el cauce tenemos las zonas de depósito entonces ni siquiera salen a grandes distancias lo erosionado y si recibimos de las partes altas parte del material que viene disuelto en el agua entonces yo considero que no es un problema grave la erosión que tenemos como tal sí.

En los años 90 al 2000 tuvimos aportes de suelo pero por la construcción del centro cultural mexiquense así como las plazas comerciales en ese entonces el municipio permitió que vinieran a tirar esos suelos agrícolas principalmente aquí en el parque entonces hemos tenido incluso hasta acumulación de materiales y eso nos cambia un poco la estructura de los suelos muchas veces y no hay problema de salinidad, pero sí nos cambió todo lo que se tenía entonces es difícil saber cuál era el suelo original. Por ejemplo, la zona que corresponde a el jardín y la zona de la loma ahí es donde vinieron a hacer muchos depósitos si tú te das cuenta cuando estás en el jardín de repente en medio y como un montículo grandote como una torre, esto porque vinieron a depositar todas las tierras y cimientos de donde esta Patio Texcoco, que eran tierras agrícolas.

No se saben si eran de buena calidad, ya que son muchos años, esto es la historia, yo no estaba aquí y obviamente eran tierras agrícolas debe de haber sido mejor calidad, pero no eran las que estaban presentes, llegan a ser suelos ricos en materia orgánica, al momento en que los sacan, los mueven, rompen la estructura y llegan aquí y llegan a ser suelos casi inertes. Por lo tanto, al analizar los suelos es lógico que cambien muchos resultados de pruebas de un sitio a otro.

- ¿Se han aplicado técnicas específicas (biológicas o físicas) para mejorar el suelo en las zonas intervenidas?

Hemos hecho algunas aproximaciones de materia orgánica a medida de pruebas piloto, pero muy general, en realidad no.

- ¿Qué efectos han tenido las actividades humanas o fenómenos naturales (incendios, lluvias intensas) sobre la calidad del suelo en los últimos años?

Considero que sí sobre todo los incendios, estos son sobre materiales ligeros básicamente pastos y arbustos son incendios que son muy rápidos, pero si descubren el suelo y no es mucha la aportación de materia orgánica entonces sí se empieza a perder materia orgánica, organismos a partir de los mismos. Y hemos tenido algunas lluvias torrenciales que no han sido las más graves no ha hecho un gran cambio yo creo que lo que más puede pues lo afectar son los incendios.

Y en cuanto a actividades humanas, no hay una afectación sobre el suelo, se hacen monitoreos sobre residuos y no ha habido mayor problema, incluso la casi nula ganadería es a la periferia y se ha erradicado.

SECCIÓN 3: BIODIVERSIDAD (ESTADO/PRESIÓN)

- ¿Qué protocolos o metodologías utilizan para monitorear la presencia, abundancia y diversidad de especies de flora y fauna en el parque? ¿Quiénes participan en ese monitoreo (personal técnico, comunidades, visitantes)?

Básicamente, quienes participan son la brigada y el personal del parque, la brigada compuesta por personas casi todos del área de recursos naturales o ligados a esto entonces esto nos ha permitido sí poder seguir al pie de la letra los mismos protocolos de CONANP y ha dado la oportunidad de por fin contar con un listado de especies de flora y fauna existentes en el parque, resultando en un programa de manejo donde identificamos más de 540 especies.

- ¿Han detectado cambios en la biodiversidad asociados a la reforestación, el uso público del parque o a otras actividades humanas? ¿Existen especies indicadoras que utilicen para evaluar estos cambios?

Hemos notado un cambio significativo sobre todo en fauna, a raíz de COVID, del tiempo que duró el parque cerrado, nos marca una separación entre el antes y el después vimos que aparecieron especies o ampliaron su distribución algunas especies que ya no los habíamos visto, un ejemplo así muy básico, muy obvio es con las ardillas, estas ya se habían quedado en un parte muy restringida del parque, en lo que corresponde el vivero de CONAFOR, a raíz de que viene la pandemia se cierra el parque al público empiezan a presentarse y hoy en día ya tenemos aquí en el casco de la hacienda ardillas y tenemos además este otro tipo de flora y fauna que hemos visto que se ha estado desarrollando.

La segunda parte es que a raíz de COVID que pudimos restringir algunas áreas del parque e incrementamos la vigilancia con las brigadas, entonces eso nos ha permitido favorecer la presencia de otras especies

- ¿Utilizan especies bioindicadoras para evaluar la calidad ambiental del ecosistema?

Sí es complejo mencionar todas, sin embargo, las más comunes son Tlacuaches y como nocivos los perros y gatos. En cuanto a Tlacuaches y cacomixtles se observa como ha aumentado su población. En la cuestión de flora usamos como indicador la higuera o la bola de rey a las que les hemos hecho campañas para desplazarlas porque son especies invasoras, entonces estamos sacando y sacando especies para ver si han aumentado disminuido la superficie que abarcan.

- ¿Tienen zonas particulares de conservación en el parque? ¿Cuáles son?

Sí a partir de lo que es nuestro programa de manejo hicimos una zonificación, lo que nos ha permitido ciertas partes de conservación una de ellas es el jardín, loma baja y loma alta, que son zonas que estamos manejando como áreas de restauración o de recuperación, donde limitamos las actividades a actividades de muy bajo impacto.

SECCIÓN 4: PRESIONES AMBIENTALES (PRESIÓN/RESPUESTA)

- ¿Qué actividades humanas representan las principales presiones sobre los recursos naturales del parque (turismo, residuos, vandalismo, incendios, etc.)? ¿Se cuantifican o monitorean?

Les estamos monitoreando, pero la principal es el turismo descontrolado y que se da todo lo largo del cauce del río, en lo que llamamos la zona de ahuehuetes, es donde se encuentran los comercios donde se encuentran los caballos y es la zona donde se concentra la gente, hacia fuera tenemos poca concentración, tenemos el vivero de CONAFOR y un estacionamiento, pero no es tan grave. Lo principal es la presión turística y la basura, entonces esa es la problemática dentro del parque. Por otra parte, fuera del parque, a la periferia, tenemos la presión por el cambio de uso de suelo, es impresionante a menos de un año comenzaron a crecer las construcciones por todos lados y es lo que nos va aislando siendo un factor de riesgo, pues surge la posibilidad de perder la riqueza biológica del parque. Por ejemplo, junto a la zona del jardín están haciendo una construcción, mencionan que es un fraccionamiento

- ¿Cómo ha evolucionado la presión antropogénica en los últimos años?

Ha ido creciendo, se ha podido comprobar a partir de excluir ciertos espacios de la entrada al público con la presencia de mayor vigilancia brigada y o sea si ha crecido el turismo pero lo hemos podido lograr mantener y hemos trabajado mucho en sensibilización para que la gente entienda, es difícil en el sentido de no poder medir estos actos de sensibilización, sin embargo, vemos que cada vez más se van respetando estos espacios que nosotros hemos ido dejando al margen.

- ¿Cómo involucran a las comunidades locales y visitantes en la conservación y monitoreo del parque?

En el caso de las comunidades cercanas con la participación de algunos jóvenes los programas, no nada más de la brigada, sino también programas de subsidio que hemos ido impulsando como procodes, en donde se les apoyó con financiamiento, o proyectos como el caso de las abejas que tienen ahí que son de comunidades cercanas y no tenemos la capacidad de manejo total pero lo estamos manejando en conjunto con un especialista, son de ellos pero trabajan muy de la mano con nosotros entra en sensibilización de hecho esta semana el martes vino un grupo de estudiantes de veterinaria a una plática y un taller práctico de manejo de abejas y hemos tenido otros proyectos similares, en los que trabajamos de manera coordinada, eso en cuanto a comunidades.

Tenemos algo que es la sociedad civil organizada y público en general que los invitamos a campañas de reforestación y limpieza del río o de los estacionamientos y demás, entonces ahí lo que buscamos es nada más que vengán siendo como de alguna manera se llevan información de la importancia de la actividad que están haciendo y el impacto que están generando en un momento dado hacia la misma sociedad.

- ¿Existen conflictos entre la conservación y el uso público del parque? ¿Cómo se gestionan?

El comercio siempre va a estar presionando, si bien, ahora tenemos un área de uso público definida la prisión para que seguir queriendo crecer pues es obvio y lógico muy fuerte. Entonces hemos ido trabajando en como llegamos a consensos, “Ok, te vamos a dejar esta parte, pero no puedes estar haciendo estas actividades” y lo ha tomado bien ha tomado bien porque no se le restringe la actividad solamente se les transforma

- ¿Cree en general que el estado del bosque está en buen estado?

Está en buen estado, pero empezamos a tener presencia de plagas como el heno motita que afecta el crecimiento de los árboles, así como el muérdago pero que se está presentando en general en todos los terrenos alrededor del parque incluso en el centro de Texcoco es una plaga que empieza a crecer a nivel regional y tenemos la presencia aquí en el parque. Si hay buena salud, pero con un alto riesgo de contagio.

SECCIÓN 5: RESPUESTAS Y ESTRATEGIAS (RESPUESTA)

- ¿Qué acciones concretas han implementado para conservar o rehabilitar las zonas degradadas del parque?

Reforestaciones con especies más adecuadas al clima, control de especies invasoras y exóticas en todo sentido, campañas de limpieza, el monitoreo de todas las especies, la vigilancia continua, el programa de manejo como argumento legal para para manejo y planeación a mediano y largo plazo.

- ¿Han observado resultados en las áreas reforestadas?

No han sido los resultados esperados cien por ciento, pero se ha ido trabajando, hemos ido recuperando pequeñas zonas poco a poco. No hay muchas personas interesadas en participar, pero gracias a los recorridos que hemos tenido de avifauna cada vez hay más personas interesadas en participar y se han venido sumando a las acciones entonces yo creo que en ese sentido es bastante bueno, pero no es suficiente nos falta muchísimo. Si estamos hablando que el parque tenemos de 100 a 120 visitantes al año si contamos el 1% sería maravilloso, yo creo que no llegamos al 1% que verdaderamente quiera participar, entonces es un reto. Se han acercado cada vez más grupos de la sociedad civil a querer trabajar con nosotros, aproximadamente 5 o 10 personas que están trabajando y hemos ido ampliando

Surge un problema con la integración en reforestación, vienen plantan unos 5 árboles y se van con su conciencia ambiental tranquila, Pero ¿qué sucede después de que plantaste el árbol? Y ahí es donde se involucrar a la gente, en el segundo proceso, donde hay que darle mantenimiento, riego, limpieza, protección de incendios, entre otras, y ahí es donde hemos estado batallando. Por ejemplo, hicimos una brecha cortafuego y al otro día el viento hizo que se brincara el fuego y se quemó, nosotros hicimos la brecha pegada a la carretera y el incendio se vino del otro lado.

Este año tuvimos 8 incendios en todo el parque y 5 fueron en esta zona del jardín, suena poco, pero es una superficie muy pequeña.

- ¿Cuentan con indicadores para evaluar la efectividad de las acciones de rehabilitación?

No, en realidad todavía no, porque no los hay, primero se debe generar nuestra línea básica es lo que hemos venido haciendo para poder empezar a generar indicadores, entonces estamos terminando la etapa de saber qué y cómo lo tenemos, entonces a partir de eso sí establecer algunos puntos en donde podamos estar haciendo control yo creo que lo más avanzado que

tenemos es en el caso de contaminación del agua pero ahí no hay problema haces análisis siempre te sigue saliendo igual de contaminado, y sí está contaminado pero no tenemos metales pesados por lo que se puede tratar de alguna manera pero tendría que ser desde la zona de arriba no nosotros.

- ¿Se utilizan los resultados del monitoreo para definir o modificar las políticas y acciones de manejo en el parque?

Se utilizan principalmente para definir nuevas zonas de protección.

- ¿Qué retos enfrenta la gestión del parque para responder a nuevas presiones o cambios ambientales, y qué apoyos serían necesarios para fortalecer la respuesta institucional?

Un problema grave es la falta de presupuesto, tenemos que estar buscando por dónde podemos obtenerlo, el gobierno no está dando recursos para estas áreas, y entonces tenemos que buscar a estos aliados que en algunas ocasiones son empresas algunas otras son los grupos organizados en donde vamos gestionando que nos apoyen con mano de obra, con materiales o herramientas en algún momento dado. Antes había un poco más presupuesto de gobierno, sin embargo, actualmente este es dirigido a programas sociales y nosotros manejamos muy pocos.

- ¿Reciben apoyo institucional o financiamiento externo para programas de restauración ecológica?

Sí, el gobierno del estado está apoyando con planta, por ejemplo, pero cuesta mucho trabajo pagar la mano de obra, en ese caso tenemos que conseguir que la gente participe en las campañas de reforestación, pero cuesta mucho trabajo que trabaje la gente en obras de restauración, se enfocan especialmente en solo venir y plantar.

PREGUNTA DE CIERRE

Para finalizar me podría dar ejemplos concretos de éxito o fracaso en la gestión del parque, así como preguntar sobre cómo se integra la información de monitoreo en la toma de decisiones a nivel local, estatal o nacional.

bueno ahí es interesante nosotros estamos trabajando hoy patrimonio biocultural si bien somos un parque nacional el motivo de creación del parque es proteger el monumento histórico y ese monumento histórico resulta que es patrimonio industrial siempre que pensamos en la hacienda pensamos en la cuestión agrícola y resulta que bueno esta fue una hacienda industrial, hubo un momento dado en que se crea como batán y sigue trabajando hasta el final de los años como batán después se agrega la parte del molino como molino de trigo, posterior se agrega la actividad del pulque y se agregó también la actividad comercial, este era un centro comercial importante, entonces tenemos cuatro actividades que se estaban dando de manera simultánea y eso es lo que provoca que se cree un parque nacional ya en el momento como decreto. A raíz de eso y de que pasa que en parque nacional hoy en día venimos trabajando en como conjuntamos estas dos parte, la parte de historia y la parte ambiental porque todo mundo pensaba que no tenía una importancia ambiental y resulta que sí, tenemos casi la misma cantidad de especies que el lago de Texcoco con sus 14000 hectáreas, sí son condiciones distintas pero cómo empezamos a sumar estas situaciones y entonces se conjuntan muy bien y de ahí empezamos a trabajar con el INAH en la parte de restauración y ellos empiezan a cambiar también su política, la gente que está aquí, de qué se debe de preservar y cómo se debe de preservar porque llegan con la idea de no debe de haber animales ni vegetación, cuando aquí está funcionando como tal, entonces tenemos este cambio de visión en la institución y en la misma institución estamos trabajando

entonces hoy en día empezamos a hacer un referente tanto a nivel nacional e internacional a través de procesos de organización institucional en donde estamos fusionando ambas instituciones y conservamos. Entonces eso ha sido importante, ya hemos presentado en algunos congresos a nivel internacional

Aquí surge la importancia de todo el trabajo porque empieza a tener una proyección que va más allá de lo local, al presentar resultados, por ejemplo, en el área de arquitectura nos dicen “que dicen bonito están haciendo esto”, “qué importante es que esté restaurando”. Entonces creo que en ese sentido es muy muy importante y eso lo hemos logrado conseguir a partir de los estudios de monitoreo, sabiendo que tenemos como lo tenemos y entonces vemos como empezamos a proteger.

2. ENTREVISTA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PNMFN MEDIANTE EL MODELO PRESIÓN-ESTADO-RESPUESTA

Nombre del entrevistado(a): **Magdalena García**

Cargo: **Miembro de la brigada Anauak**

Institución: **Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas**

Fecha: **Mayo 2025**

Nombre del entrevistador(a): **Dafne Fernanda Juárez Zavala**

Objetivo de la entrevista: Recabar información clave con un miembro de la brigada de monitoreo del PNMFN sobre el estado actual del ecosistema forestal, las presiones que enfrenta y las acciones de respuesta implementadas en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, como parte de la aplicación del modelo Presión-Estado-Respuesta para la identificación de impactos ambientales.

Bloque 1. Indicadores y herramientas de monitoreo

- **¿Cuáles son los principales indicadores que la brigada monitorea para evaluar el estado del bosque y su vegetación?**
Actualmente, en cuanto a flora, se monitorea la composición y estructura de la vegetación en el parque nacional, tanto en la parte boscosa como de pastizal y matorral. Estos indicadores se toman de acuerdo con la metodología de los protocolos de monitoreo ecosistémico en áreas naturales protegidas de la CONANP.
- **¿Qué herramientas o metodologías utilizan para monitorear especies de fauna y flora?**
Este mismo protocolo de la CONANP se utiliza para el monitoreo de fauna en el parque.
- **¿Cuáles son las principales herramientas de monitoreo propuestas por la CONANP?**
La CONANP tiene protocolos de monitoreo ecosistémico para que sean usados en todas las áreas naturales protegidas, con el propósito de homogenizar la información en todo el país. Además, promueve la creación de brigadas de monitoreo y vigilancia comunitaria mediante el programa PROREST.

Bloque 2. Estado de conservación y presiones

- **¿Cómo describirías el estado de conservación de las áreas forestales dentro del parque?**
Hay algunas áreas dentro del parque que están un poco más conservadas que otras, y es algo de esperarse, ya que el parque, durante mucho tiempo, fue tratado como un parque urbano hasta que ingresó la CONANP en 2018. Hubo muchas reforestaciones con especies no adecuadas para el lugar; sin embargo, áreas como el bosque de galería son de las más conservadas. Además, actualmente se trabaja en procesos de restauración ecológica.
- **¿Han identificado cambios notables en la salud del bosque en los últimos años?**
Sí, principalmente en la parte arbustiva y herbácea. A finales de 2024 y lo que va de 2025, se ha trabajado, por ejemplo, en la remoción de plantas exóticas invasoras, lo cual ha ayudado a que especies nativas vuelvan a crecer en estos lugares, haciendo que haya más diversidad de especies.
- **¿Cuáles son las principales presiones o amenazas que enfrenta el bosque?**
A mi consideración, las principales presiones que enfrenta el bosque son las especies exóticas invasoras, los incendios forestales y, en general, la presión urbana, ya que el crecimiento urbano alrededor del parque va en aumento.
- **¿Qué zonas son más vulnerables a la degradación o presión humana?**
Las zonas cercanas a vías de comunicación y los límites del parque.
- **¿Se han presentado afectaciones en el suelo? ¿Cómo lo detectan?**
Hemos detectado pérdida de cobertura, que se presenta después de los incendios, y compactación en los sitios de mayor paso de personas.
- **¿Qué tipo de residuos o contaminación son más comunes y cómo impactan?**
La basura inorgánica es la más común y afecta el ecosistema al alterar el suelo y la fauna.

Bloque 3. Respuestas implementadas

- **¿Qué acciones realiza la brigada para mitigar impactos ambientales? ¿Participan en restauración con plantas o hongos nativos? ¿Han tenido experiencias con inoculación ectomicorrízica?**
Se ha trabajado en brechas cortafuegos, campañas de limpieza de basura en el bosque de galería, remoción de especies exóticas invasoras y reforestaciones con especies nativas. Recientemente, se estableció un vivero donde se realizó un taller de inoculación ectomicorrízica.
- **¿Realizan actividades de educación ambiental? ¿Cómo influyen en los visitantes?**
Hemos realizado reforestaciones, limpiezas y talleres de educación ambiental en el casco de la hacienda. Los visitantes se muestran interesados por participar y aprender qué es o qué hay; se muestran curiosos por aprender más sobre cómo pueden ayudar para restaurar y proteger el parque.
- **¿Tienen protocolos establecidos por la CONANP para actuar ante incendios u otras emergencias?**
De manera general, existen brigadas contra incendios, pero, lamentablemente, en el PNMFN no hay una. Sin embargo, algunas personas capacitadas acudimos a ellos; además, se hace el llamado a bomberos o Protección Civil en Texcoco.

- **¿Qué tan involucrada está la comunidad local o los visitantes en la conservación?**
La verdad es que es muy poco; cuando se les convoca, se involucran más personas del ámbito académico o ambiental.
- **¿Existen mecanismos para recibir retroalimentación o denuncias sobre afectaciones?**
Siempre se puede acudir a las oficinas del parque con el director, Agustín Tagle, o enviar un correo para darle seguimiento.
- **¿Puedes compartir un caso significativo de protección o recuperación forestal?**
Cerca del bosque de galería y el estacionamiento, se han logrado recuperar dos áreas para reforestación.
- **¿Qué herramientas, capacitación o apoyo consideran necesarios para fortalecer su labor?**
Apoyo para mantener las brechas cortafuegos, constantemente buscamos capacitaciones y material para el vivero forestal.

3. Encuesta en el Parque Nacional "Molino de Flores Nezahualcóyotl", Texcoco de Mora, Estado de México

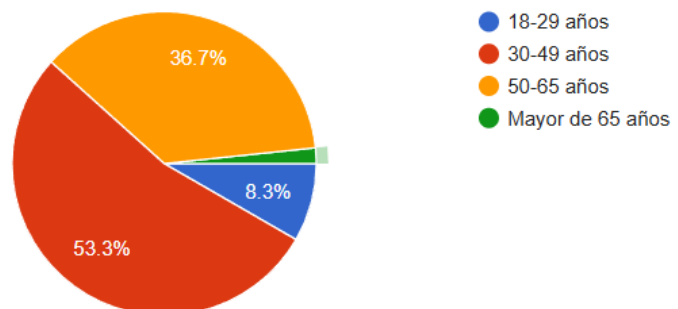
Se realizó una encuesta a 120 visitantes del Parque Nacional "Molino de Flores Nezahualcoyotl" en Texcoco de Mora, Estado de México, con el objetivo de conocer sus características, hábitos de visita, percepciones sobre el estado del parque y recomendaciones para su conservación. A continuación, se presentan los resultados organizados de manera lógica y coherente.

Perfil de los Visitantes

El parque atrae principalmente a adultos de mediana edad, con una proporción significativa de personas ligeramente mayores, seguidas de un grupo más pequeño de adultos jóvenes y muy pocas personas mayores. Esto sugiere un enfoque en familias o personas que buscan ocio, lo que podría no ser atractivo para grupos demográficos más jóvenes o mayores. La mayoría de los visitantes vienen ocasionalmente, algunos regresan con regularidad y menos lo hacen con poca frecuencia o por primera vez, lo que indica una participación moderada, pero un éxito limitado en atraer a nuevos públicos. El principal atractivo es la recreación, seguida del deseo de conectar con la naturaleza, con un interés mínimo en actividades académicas o de conservación.

Distribución por Edad

- **53.3%:** Entre 30 y 49 años.
- **36.7%:** Entre 50 y 65 años.
- **8.3%:** Entre 28 y 29 años.
- **1.7%:** Mayores de 65 años.



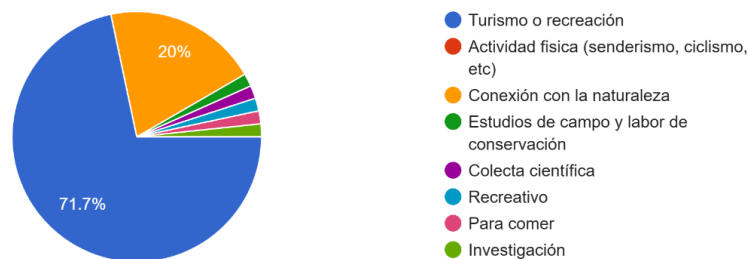
Frecuencia de Visitas

- **38.3%:** Visitan ocasionalmente (1 a 2 veces por año).
- **31.7%:** Visitan regularmente (3 o más veces por año).
- **26.7%:** Han visitado muy pocas veces.
- **3.3%:** Visitaban el parque por primera vez.



Motivos de Visita

- **71.7%:** Turismo o recreación.
- **20%:** Conexión con la naturaleza.
- **1.7% (cada uno):** Estudios de campo, labores de conservación, colecta científica, actividades recreativas, alimentación e investigación.



Actividades Realizadas

Los visitantes, quienes podían elegir más de una opción, mencionaron las siguientes actividades principales, en orden de preferencia:

1. Observación de fauna y flora.
2. Fotografía.
3. Actividades familiares al aire libre.
4. Senderismo.
5. Consumo de alimentos.
6. Fines laborales o de investigación.

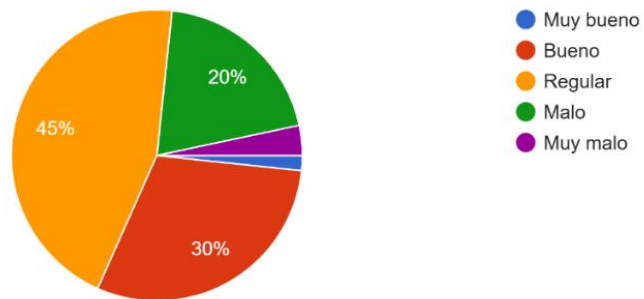
Percepción del Estado del Parque

Los visitantes perciben los ecosistemas del parque como, en general, normales; algunos los consideran bien mantenidos y otros, degradados, lo que refleja la preocupación por la limpieza y la salud de la vegetación. Poco más de la mitad de los visitantes se percatan de los esfuerzos de reforestación, pero muchos los pasan por alto, y quienes los ven a menudo los consideran adecuados, pero no excepcionales, lo que sugiere una implementación inconsistente. Las percepciones sobre la biodiversidad están divididas: algunos la consideran abundante y otros, limitada, lo que indica experiencias variadas en todo el parque. Los esfuerzos de conservación se perciben, en general, como normales, con cierta insatisfacción, lo que apunta a un impacto insuficiente.

Calidad de los Ecosistemas Forestales

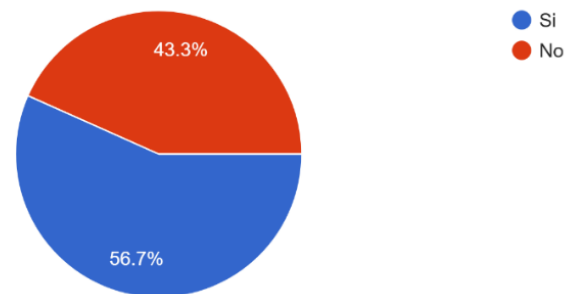
Los visitantes evaluaron la calidad de los ecosistemas forestales considerando la cobertura vegetal y la limpieza:

- **45%:** Calidad regular.
- **30%:** Calidad buena.
- **20%:** Calidad mala.
- **3.3%:** Calidad muy mala.
- **1.7%:** Calidad muy buena.



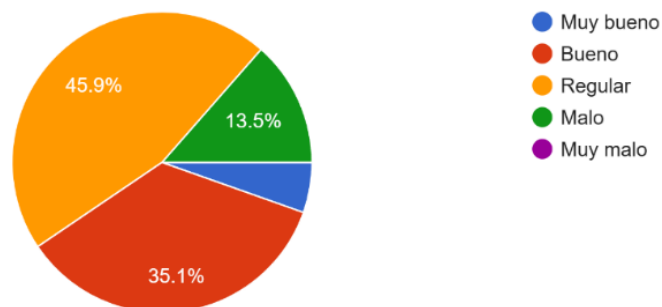
Percepción de Reforestaciones

- **56.7%:** Identificaron acciones de reforestación en el parque.
- **43.3%:** No notaron reforestaciones.



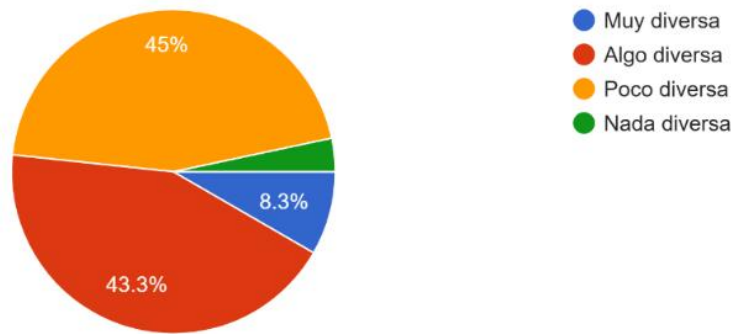
Entre quienes identificaron reforestaciones, las opiniones sobre su calidad fueron:

- **45.9%:** Regular.
- **35.1%:** Buena.
- **13.5%:** Mala.
- **5.4%:** Muy buena.



Diversidad Faunística y Florística

- **45%:** Consideran que la diversidad es poco diversa.
- **43.3%:** Consideran que hay una diversidad amplia.
- **8.3%:** Consideran que es muy diversa.
- **3.3%:** No percibieron diversidad.

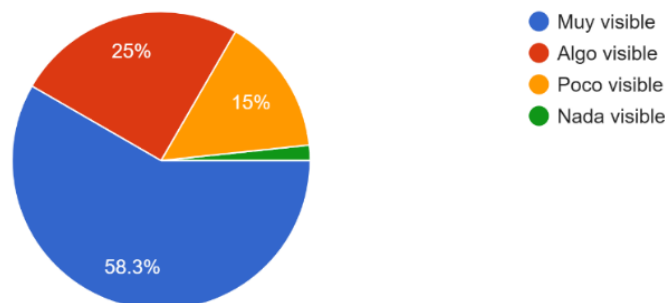


Impacto Humano en el Parque

El impacto humano es ampliamente perceptible: muchos lo consideran significativo, otros moderado y algunos mínimo. Este impacto está impulsado por el comercio, el turismo, la recreación, los incendios y la aparente falta de compromiso de las autoridades y los visitantes.

Visibilidad del Impacto Negativo

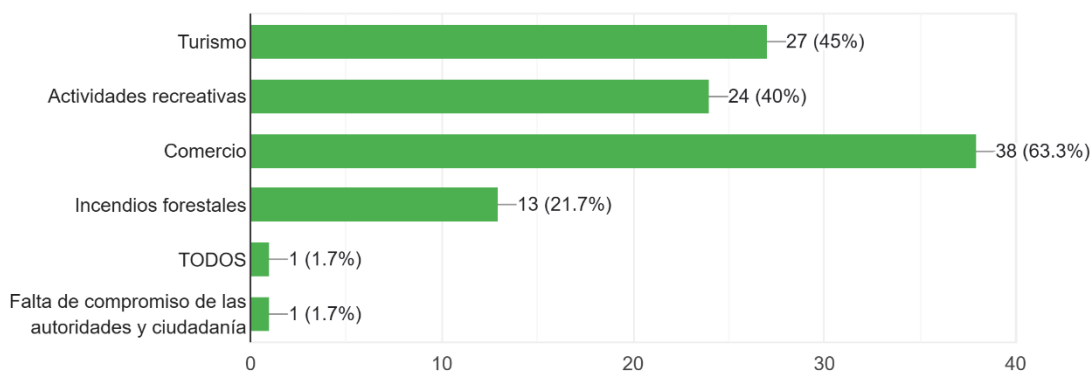
- **58.3%:** Consideran que el impacto negativo de las actividades humanas es muy visible.
- **25%:** Medianamente visible.
- **15%:** Poco visible.
- **1.7%:** Nada visible.



Actividades con Mayor Impacto

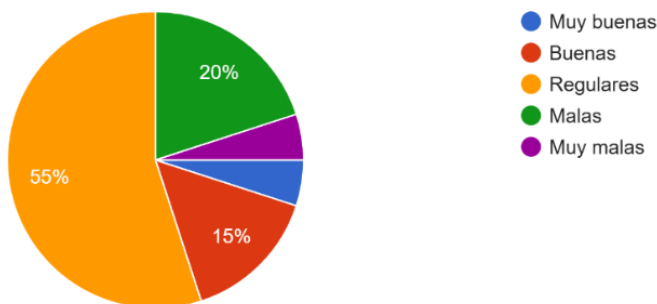
Los visitantes, quienes podían elegir más de una opción, identificaron las siguientes actividades como las de mayor impacto en los ecosistemas forestales, en orden de mención:

1. Comercio.
2. Turismo.
3. Actividades recreativas.
4. Incendios forestales.
5. Falta de compromiso de autoridades y ciudadanía.



Evaluación de las Acciones de Conservación

- **55%:** Consideran que las acciones de conservación son regulares.
- **20%:** Malas.
- **15%:** Buenas.
- **5%:** Muy malas.
- **5%:** Muy buenas.



Recomendaciones de los Visitantes

Los visitantes proponen reforestar con especies nativas, establecer viveros locales y restaurar ecosistemas para mejorar la salud ambiental. Solicitan limpiezas exhaustivas, gestión de residuos y prevención de incendios para contrarrestar la degradación. Se sugieren talleres educativos y señalización para fomentar el aprecio por la biodiversidad, además de limitar el acceso de visitantes, regular el comercio y aumentar la supervisión para gestionar los impactos. Las ideas de infraestructura incluyen la creación de un arboreto y la mejora de las instalaciones ecoturísticas.

Reforestación y Restauración Ecológica

- Promover campañas de reforestación con especies nativas y seguimiento a los proyectos.
- Crear un vivero forestal local y acopiar plantas nativas (árboles, hierbas, arbustos).
- Introducir especies arbóreas y arbustivas tolerantes a la contaminación y suelos pobres.
- Implementar un programa integral de restauración ecológica.
- Promover la sucesión de vegetación hacia especies forestales locales.

Limpieza y Mantenimiento

- Realizar limpiezas exhaustivas del parque y el río, que presenta olores y basura.
- Instalar botes de basura y promover una cultura de limpieza.
- Dar mantenimiento a áreas naturales, senderos y árboles antiguos.

- Evitar la introducción de fuego (encendedores, cigarrillos, etc.).
- Crear brechas cortafuegos y deshierbar las orillas cercanas a las carreteras.

Educación y Concienciación

- Implementar talleres de educación ambiental (compostaje, separación de residuos, cuidado de la naturaleza).
- Colocar pancartas y carteles sobre la protección de flora y fauna.
- Difundir más información sobre las actividades y la biodiversidad del parque (historia, tradiciones).
- Fomentar valores para mantener el ecosistema y educar a los visitantes.

Gestión y Regulación

- Limitar el número de visitantes y administrar la capacidad de carga del parque.
- Restringir el comercio, la venta de alimentos y bebidas alcohólicas.
- Evitar la expansión de áreas urbanas y atracciones mecánicas.
- Definir senderos específicos y acotar áreas para proteger zonas sensibles.
- Establecer planes claros de protección y solicitar apoyo a instituciones como Chapingo o escuelas locales.
- Implementar mayor vigilancia en todas las áreas del parque.

Infraestructura y Promoción

- Crear un arboretum o jardín botánico, aunque requiere más recursos.
- Mejorar las instalaciones para difundir conocimiento sobre la biodiversidad.
- Promover actividades como el senderismo y el ecoturismo.
- Dar mantenimiento continuo y seguimiento a los proyectos de conservación.

Otras Sugerencias

- Tratar biológicamente las aguas que pasan por el molino.
- Restringir el acceso con comida en áreas históricas.
- Promover actividades económicas que valoren los bosques conservados.
- Crear brigadas de limpieza comunitarias y gubernamentales.
- Limitar el acceso a ciertas zonas para permitir la regeneración natural.