



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Departamento El Hombre y su Ambiente
Licenciatura en Biología

Informe final de Servicio Social

**Extracción e identificación de esporas de hongos micorrizógenos
arbusculares en suelos de los bosques templados de la
región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla**

Joseph Daniel Silva Zamudio
Matrícula: **2192051382**

Dr. Facundo Rivera Becerril
No. Eco. 18775
Asesor Interno
UAM-Xochimilco

Dra. Irene Sánchez Gallén
No. Eco. 118548
Asesor Externo
Facultad de Ciencias, UNAM

Ciudad de México, a 24 de abril de 2024

Índice

Resumen	3
Introducción.....	5
¿Qué son los HMA?	6
Características morfológicas y clasificación de los géneros de HMA.....	6
Caracterización y descripción de algunos géneros de HMA	8
Variables y actividades antrópicas que afectan las comunidades de HMA	9
Afectaciones por actividades o manejo silvícolas	10
El manejo silvícola en México	10
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos	12
Métodos	13
Área de estudio	13
Elaboración de mapas	17
Caracterización del suelo	17
Aislamiento y conteo de esporas	18
Caracterización morfológica y conteo de esporas	18
Estadística.....	19
Actividades Realizadas.....	20
Metas Alcanzadas.....	22
Resultados	23
Índices de diversidad y estimación de riqueza de especies de los tratamientos del MMOBI	29
Índices de diversidad y estimación de riqueza de los tratamientos del MDS por sitio.....	31
Influencia del pH, y porcentaje de materia orgánica (MO) en la abundancia, riqueza y diversidad de HMA en el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y en el Método de Desarrollo Silvícola (MDS)	33
Diferencias entre tratamientos del MDS y MMOBI	36

Similitud de la composición de especies entre los sitios de los tratamientos del MMOBI y MDS 37	
Escalamiento multidimensional no métrico (NMDS).....	39
Discusión y conclusiones.....	41
Recomendaciones	42
Referencias	43
Anexos	46

Resumen

La diversidad de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) ha sido poco estudiada en bosques templados de México. A pesar de que se tiene conocimiento de la dominancia de HMA de algunos géneros en los mismos bosques, no hay

información respecto a la composición o estado de sus comunidades, en específico, las comunidades de HMA en la región Chignahuapan-Zacatlán. Aunado a esta situación, algunos bosques de esa región mantienen métodos de manejo silvícola intensivos que afectan directamente la diversidad de HMA de esas comunidades. En el área de estudio del presente informe se abarcaron dos ejidos de los municipios de Chignahuapan e Ixtacamaxtitlán, donde se aplican dos métodos diferentes de manejo silvícola intensivos, Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y Método de Desarrollo Silvícola (MDS) respectivamente. Se realizó una primera aproximación para el conocimiento de la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en función del manejo silvícola que se aplica en las parcelas ubicadas en los ejidos de Llano Grande y Minillas de los respectivos municipios mencionados. Se siguió el método de decantado y tamizado húmedo para la extracción de esporas para su posterior identificación visualizando su morfología. Posteriormente, con los datos obtenidos en el proceso de identificación, se realizó una base de datos para realizar el apartado estadístico para estimar la diversidad de especies en una comunidad, visualizar si hay similitudes de las abundancias en las especies, un dendrograma para identificar similitudes de especies entre comunidades, y estimar el número real de especies entre abundantes y raras. Después, se realizó una comparación tomando en cuenta parámetros como el pH y el porcentaje de materia orgánica del suelo por manejo silvícola. Se identificaron 122 morfotipos de HMA entre los dos manejos silvícolas, por otra parte, cabe destacar que los sitios de MDS tiene un manejo más intensivo y aparentemente las comunidades de HMA no se ven tan alteradas por los parámetros tomados, mientras que en los sitios del MMOBI sí se ven fuertemente afectadas negativamente. Esto puede deberse a que el MMOBI es menos controlado y regulado en la corta de madera, mientras que el MDS se enfoca en la regeneración de bosques jóvenes y en hacer aclareos. Como conclusión, se determinó que el pH y la materia orgánica no son variables determinantes para evaluar las condiciones de las comunidades de HMA en dichos bosques de manera acertada. además de dar a conocer algunos géneros que están presentes en estos bosques.

Abstract: The diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) has been little studied in temperate forests of Mexico. Although there is knowledge of the dominance of AMF of some genera in the same forests, there is no information regarding the composition or status of their communities, specifically, the AMF communities in the Chignahuapan-Zacatlán region. In addition to this situation, some forests in that region maintain intensive silvicultural management methods that directly affect the diversity of AMF in these communities. The study area of this report included two ejidos in the municipalities of Chignahuapan and Ixtacamaxtitlán, where two different intensive silvicultural management methods are applied, the Mexican Method of Irregular Forest Management (MMOBI) and the Silvicultural Development Method (MDS), respectively. A first approach was made to know the community of arbuscular mycorrhizal fungi based on the silvicultural management applied in the plots located in the ejidos of Llano Grande and Minillas of the respective municipalities mentioned. The decanting and wet sieving method was followed for the extraction of spores for their later identification by visualizing their

morphology. Subsequently, with the data obtained in the identification process, a database was created to perform the statistical section to estimate the diversity of species in a community, to visualize if there are similarities in the abundances of the species, a dendrogram to identify similarities of species between communities, and to estimate the real number of species between abundant and rare. Afterwards, a comparison was made taking into account parameters such as pH and the percentage of organic matter in the soil by silvicultural management. 122 AMF morphotypes were identified between the two forestry management systems. Furthermore, it is worth noting that the MDS sites have a more intensive management and apparently the AMF communities are not as altered by the parameters taken, while in the MMOBI sites they are strongly affected negatively. This may be due to the fact that the MMOBI is less controlled and regulated in the cutting of wood, while the MDS focuses on the regeneration of young forests and on thinning. In conclusion, it was determined that pH and organic matter are not determining variables to accurately assess the conditions of the AMF communities in these forests. In addition to revealing some genera that are present in these forests.

Palabras Clave: HMA, Diversidad, Manejo Silvícola.

Introducción

La microbiota de los suelos tiene un papel fundamental en la regulación de los ecosistemas terrestres. Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) (Subphylum Glomeromycota) son de los microorganismos del suelo más ampliamente distribuidos; al colonizar las raíces de la mayoría de las plantas en el planeta facilitan la absorción de nutrientes y minerales (Uibopuu et al., 2009). Los HMA se han promovido como una herramienta para la preservación de especies nativas de plantas, así como para la aplicación de técnicas en sistemas agrarios y forestales. Se sabe poco de su diversidad en los bosques templados de México (Lara-Pérez et al., 2014); sin embargo, dado que hay registros de dominancia de los géneros *Acaulospora* y *Glomus* en otros tipos de comunidades vegetales, esto puede sugerir cómo son las comunidades en bosques templados a pesar de que no hay registros fúngicos en la región del presente estudio. En este sentido, los bosques templados de la región de Chignahuapan-Zacatlán mantienen un sistema silvícola intensivo que homogeneiza la diversidad de árboles transformando bosques mixtos en bosques de coníferas (Jiménez, 2017); ello modifica también las condiciones ambientales relacionadas con el sotobosque, por lo que es posible que la microbiota se vea afectada.

El presente informe se enfoca en describir la comunidad de HMA a través de la extracción de esporas y la posterior identificación de los morfotipos hasta género, con el fin de contrastar dos manejos silvícolas, el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS). Ambos métodos aplicados en bosques templados de pino y oyamel en los ejidos Llano Grande y Minillas en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán del estado

de Puebla, contribuirán en determinar cómo influyen el pH y la materia orgánica en la diversidad de las comunidades de HMA.

¿Qué son los HMA?

Los HMA son organismos que se caracterizan por presentar micelio cenocítico y por carecer de una reproducción sexual; forman de manera general asociaciones mutualistas con raíces de diversas especies de plantas (Coral-Ruiz, 2015). Son heterótrofos simbiotes obligados al formar relaciones simbióticas con las raíces de sus huéspedes. Dicha interacción es fundamental para ellos ya que de las plantas obtienen los carbohidratos que requieren para su subsistencia (Hernández, 2007). En otro sentido, ellos aumentan la tolerancia a diversas condiciones ambientales de sus huéspedes, reducen el estrés abiótico, mejoran la agregación del suelo, el flujo del agua, la absorción de nitrógeno y fósforo; también reducen el estrés biótico, aportan resistencia contra patógenos (Delgado-Giler et al., 2022). En los ecosistemas terrestres los HMA se asocian con plantas en forma intraradical a través de hifas cenocíticas formando arbusculos. Extraradicalmente lo hacen formando micelio y esporas multinucleadas; las esporas son estructuras que se encuentran en las raíces y en el suelo, formando un banco dinámico que responde a las condiciones ambientales de la rizósfera (Arancibia et al., 2022). En otras palabras, se plantea que los HMA son organismos que tienen conexión con la fertilidad y la nutrición de las plantas, donde las plantas hospedantes y los HMA interactúan a través de redes hifales.

Características morfológicas y clasificación de los géneros de HMA

La sistemática morfológica de los HMA es complicada; en el siglo pasado se basaba exclusivamente en las características de las esporas, en muchas ocasiones colectadas directamente de campo, lo que implica que pueden encontrarse parasitadas, parcialmente destruidas o rotas.

Actualmente, y ya con las herramientas moleculares integradas, se han descrito alrededor de 345 especies, conformando en general 4 órdenes, 10 familias y posiblemente más de 13 géneros (Tabla 1). Aún existen especies en las que no se ha podido establecer su relación filogenética clara con otros glomeromicetos; constantemente hay cambios en los taxa, lo que mantiene un cambio dinámico en su clasificación (Salmerón-Santiago et al., 2015). De acuerdo con el listado de Polo-Marcial et al. (2021), en México hay un registro de al menos 166 especies de HMA distribuidas en todo el territorio nacional en diversas condiciones ambientales y ecosistemas, donde al menos el 24% (39 especies) de las especies registradas prevalecen en ecosistemas de bosque templado.

Tabla 1. Tabla de la clasificación del Phylum Glomeromycota (Varela et al., 2008; Redecker et al., 2013; Salmerón-Santiago et al., 2015).

Phylum Glomeromycota Clase Glomeromycetes		
Orden	Familia	Género
Archaeosporales	Archaeosporaceae	<i>Archaeospora</i> <i>Intraspora</i>
	Ambisporaceae	<i>Ambispora</i>
	Geosiphonaceae	<i>Geosiphon</i>
Diversisporales	Acaulosporaceae	<i>Acaulospora</i> <i>Kuklospora</i>
	Entrophosporaceae	<i>Entrophospora</i>
	Diversisporaceae	<i>Diversispora</i>
	Gigasporaceae	<i>Gigaspora</i> <i>Scutellospora</i>
	Pacisporaceae	<i>Pacispora</i>
Glomerales	Glomeraceae	<i>Glomus</i>
Paraglomerales	Paraglomeraceae	<i>Paraglomus</i>

Existen diferentes métodos empleados para la identificación de las esporas. Uno de ellos es la secuenciación de ADN que se utiliza para analizar y comparar secuencias genéticas de los HMA con bases de datos de referencia; esta técnica permite una identificación precisa a nivel de especie (Walker & Sánchez, 1998). Gracias a la metodología de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se detectan secuencias específicas de ADN de los HMA en muestras de suelo o en raíces de plantas, con la utilización de diferentes marcadores moleculares para identificar y caracterizar los HMA a nivel genético (Redecker et al., 2013). Otro de

los métodos concierne la inoculación de plantas hospederas, donde se realiza la inoculación experimental de plantas con esporas o propágulos de HMA para estudiar su colonización y efectos (Gómez, 2007). Además de los ya mencionados, hay un método en específico que se aplicó en el presente estudio: el método por identificación morfológica, donde se observaron las esporas de los HMA bajo un microscopio, con énfasis en las características morfológicas como tamaño, forma, color y estructuras ornamentales, que son criterios fundamentales para la identificación de géneros y especies (Coral-Ruiz, 2015).

Caracterización y descripción de algunos géneros de HMA

Entrophospora

Las esporas del género *Entrophospora* se forman dentro del micelio extrarradical o, en algunas ocasiones, dentro de la raíz, y se producen intercaladamente a la hifa de sostén, donde en uno de sus ápices se ensancha o infla a manera de globo formando un sáculo. Las esporas pueden poseer paredes estructurales e internas o sólo estructurales. La germinación ocurre a partir de una estructura conocida como orbe o escudo de germinación (Hernández et al., 2007).

Acaulospora

Las esporas de este género se producen de manera lateral a la hifa de sostén que terminan en sáculo globoso. Las esporas poseen paredes estructurales e internas; ciertos estratos pueden cambiar de color con el reactivo de Melzer. Presentan la estructura conocida como “orbe de germinación”; de este género se conocen alrededor de 30 especies en el mundo (Gómez, 2007).

Gigaspora

Las esporas se producen apicalmente sobre una célula esporógena a partir de una hifa de sostén ligeramente ensanchada en su ápice, a manera de bulbo. La pared está formada por dos capas que no se separan al romper la espora, ambas capas son lisas; anterior a la germinación (Bentivenga, P. & Morton, J., 1995), se forma una tercera capa formadora de verrugas en la superficie interna. Las esporas poseen sólo pared estructural que generalmente incluye de dos a tres estratos, alguno de los cuales cambia de color con el reactivo de Melzer. Este género no forma vesículas dentro de las raíces, en cambio, forma células auxiliares (Hernández et al., 2007).

Glomus

En este género las esporas se producen en el ápice de las hifas o intercaladas en el micelio; pueden formarse individualmente en agregados laxos o compactos formadores de esporocarpos. La germinación en este género ocurre por la emergencia de una o varias hifas que atraviesan las paredes de la espora o bien por el lumen de la hifa de sostén. Este género está representado por más de 100 especies de HMA y, por lo tanto, es el que tiene el mayor número de especies en el grupo (Hernández et al., 2007; Coral-Ruiz, 2015)

Scutellospora

Las especies de este género producen esporas apicalmente a partir de una hifa de sostén en forma de bulbo; la germinación inicia desde una estructura

especializada denominada “escudo de germinación”, que es lo que da nombre al género (Hernández et al., 2007).

Sclerocytis

En este género se forman agrupaciones de esporas más o menos compactas, conocidas como esporocarpos, los cuales se caracterizan por presentar una masa semicompacta de hifas en su parte central, llamada plexo. Asimismo, en algunos casos es posible observar una cubierta compacta y laxa de hifas, denominada peridio (Hernández et al., 2007).

Variables y actividades antrópicas que afectan las comunidades de HMA

La microbiota edáfica constituye un componente esencial del sistema biótico en los ecosistemas; los HMA representan entre el 20% y el 30% de la biomasa total de la comunidad microbiana en los suelos (Peralta-Valencia et al., 2023). Este grupo fúngico se distribuye en diferentes tipos de ecosistemas, climas y tipos de suelo. En los ecosistemas terrestres los HMA se asocian con plantas para posteriormente formar esporas multinucleadas de forma extrarradical (afuera de la raíz); sin embargo, hay especies que lo hacen intrarradicalmente (Arancibia et al., 2022). La presencia de los HMA puede ser nula o escasa en suelos con problemas de erosión, donde la superficie que habitan los hongos se pierde, lo mismo que en los suelos fumigados o con aplicaciones de plaguicidas en grandes cantidades y en suelos perturbados por la actividad minera (Sieverding, 1991; Herrera-Peraza et al., 2016). También, los factores abióticos y bióticos condicionan la estructura de las comunidades de los HMA como la humedad, la estructura y la composición química de los suelos que se correlacionan con la distribución de sus comunidades (Martínez & Pugnaire, 2009). Cabe destacar que dentro de los ecosistemas de bosque templado el pH, el porcentaje de materia orgánica y el nitrógeno total son variables que influyen en la composición de especies de HMA (Peralta-Valencia et al., 2023).

Hay estudios que demuestran que el pH del suelo influye en la composición de las comunidades de HMA, y este factor puede modular fuertemente el crecimiento de las esporas y la colonización de las raíces. Esto puede tener una fuerte influencia en el crecimiento y rendimiento de los hongos, incluso hay una influencia importante en los taxa en forma individual. Por tanto, es probable que el pH sea el factor abiótico más importante que determine la abundancia relativa local. Sin embargo, el pH puede ser un factor muy variable ya que tiene un rol con factores como la temperatura, la cantidad de materia orgánica en los suelos, el clima (Davison et al., 2021), la temporada estacional, las precipitaciones (Peralta-Valencia et al., 2023), así como diferentes características edafológicas incluyendo la presencia y concentración de metales como el aluminio, manganeso y hierro (Wang et al., 1993).

En bosques templados, con su diversidad vegetal, propiedades edáficas y climas especiales, se encuentran los HMA que toleran altos contenidos de materia orgánica, pH ácido y bajas temperaturas. Una de las familias que tienen tolerancia

a las condiciones anteriormente mencionadas es la Acaulosporaceae, en la que sus miembros se caracterizan por tener una estrategia de historia de vida resistente al estrés, es decir, son capaces de tolerar condiciones de estrés elevado y baja perturbación. Los hongos pertenecientes a la familia Glomeraceae tienen una historia de vida tolerante a la perturbación, es decir, pueden tolerar condiciones de bajo estrés y alto disturbio (Peralta-Valencia et al., 2023).

Afectaciones por actividades o manejo silvícolas

La comunidad fúngica asociada a las comunidades de los bosques templados en general es altamente sensible a la composición vegetal, pérdida y fragmentación del hábitat, a la deposición de nitrógeno, cambio climático o los incendios forestales. Dicha comunidad, incluyendo la de los HMA, es fuertemente dependiente de los atributos estructurales de los bosques, por lo que se ven afectadas también por actividades y manejos silvícolas. Estas actividades pueden implicar cambios considerables en los ecosistemas forestales, el reemplazo y/o la eliminación de especies de árboles, la alteración de la estructura de clases de edades de los árboles, las alteraciones en la biomasa y en los ciclos de carbono, así como modificar el microclima y las condiciones del suelo (Tomao et al., 2020). En el estudio realizado por Uibopuu et al. (2009) se plantea que la información disponible acerca de la composición de taxa de las comunidades de HMA en bosques templados es notablemente rica en bosques mixtos y se cree que las comunidades en las raíces de plantas inoculadas no se ven afectadas por actividades de régimen de manejo forestal. Sin embargo, se cuestionaron que dichas actividades con manejo intensivo pueden influir negativamente en el crecimiento de las comunidades de HMA y en su potencial para contribuir con el crecimiento de las plantas, y si está relacionado con el empobrecimiento de las comunidades de HMA y sus inóculos, comparando dos manejos forestales (cultivable e intensivo) entre bosques de campo cultivables, antiguos y jóvenes. Concluyeron que el conjunto de hongos que estaban en un campo cultivable tuvieron un efecto positivo en el crecimiento de las plantas del sotobosque, en comparación con el conjunto de hongos sometidos a un manejo intensivo con efectos totalmente opuestos al cultivable. Por otro lado, la composición y riqueza de los taxa de las comunidades en las raíces inoculadas mostraron diferencias entre comunidades con manejo forestal de bosques de crecimiento antiguo y de campo cultivable. En tanto, las comunidades de bosques jóvenes no se diferenciaron de las dos anteriores, por lo que es notable la diferencia con base en la composición de especies y abundancias de las comunidades de crecimiento de micorrizas entre los manejos forestales intensivos con tratamiento diferente.

El manejo silvícola en México

Se tiene muy poca información sobre el impacto de los métodos silvícolas en los bosques templados mexicanos y en sus comunidades fúngicas, particularmente en

las comunidades de HMA. Sin embargo, existe conocimiento de cómo se aplican los métodos que se implementan para el aprovechamiento de los recursos maderables. En el territorio mexicano dicho aprovechamiento tiene fines comerciales, domésticos y en ocasiones, con una tendencia para el uso industrial. En la actualidad cerca del 60% de los bosques templados en México es de propiedad social, mientras que el 40% restante corresponde al sector privado o federal (Jiménez-Valle, 2016).

Antes de 1940, en todo el territorio nacional mexicano se implementó la posibilidad de corta de madera de los bosques usando fórmulas de origen europeo. En 1941 se celebró la primera convención nacional forestal, donde se planteó que dichos métodos europeos para calcular la tala de los bosques eran imprecisos para los bosques vírgenes mexicanos, por lo que se propuso la fórmula para calcular la posibilidad de corta basada en el incremento de la masa, la magnitud de las existencias reales actuales y las normales. El Servicio Forestal Oficial de México remarcó la importancia de calcular su incremento anual y con base en éste, en la fórmula del interés compuesto y en una intensidad de corta no mayor al 35% de las existencias reales totales para poder calcular un ciclo de corta que permitiera por lo menos la recuperación de los volúmenes extraídos en cada rodal intervenido. Por lo anterior, se propuso y aprobó en 1951 el Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM) (Torres, 1999), que posteriormente en 1980 fue sustituido por el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) al incorporar la relación del número de árboles de diferentes categorías diamétricas que debe haber en un bosque normal por unidad de superficie (Hernández-Díaz, 2008). El MMOBI se implementa principalmente en bosques templados y modifica las características del bosque para tener una composición balanceada en edad y volumen de los bosques compuestos de coníferas o latifoliadas con cierta diversidad de especies con distintas edades y tamaños. El aprovechamiento de corta de árboles o intensidad de corta no debe ser mayor al promedio del ciclo de corta (generalmente árboles de 10 años) para permitir una recuperación del volumen cortado antes de la siguiente intervención (Barrón-Sevilla, 2021).

En 1970, se observó que había bosques que se originaron de cortas intensivas efectuadas en bosques templados a principios del siglo XX. A estos bosques se les llamaba de “segundo crecimiento” y semejaban estructuras tendientes o regulares por lo que se les denominó como “silvicultura intensiva”; después, fue conocido como Método de Desarrollo Silvícola (MDS) (Hernández-Díaz, 2008). Este método se caracteriza por ser totalmente aplicado en bosques templados, en el que se organiza la masa forestal por zonas, para que de esta manera se proceda a la renovación de la especie elegida. En este manejo silvícola se aplican varias cortas de aclareo en la etapa de crecimiento rápido y al final del ciclo se aplica la corta de regeneración por el método de árboles padres. Éste último consiste en la remoción de masas maduras en una sola corta, con excepción de algunos árboles aislados o en grupo, que proveen el abastecimiento de semilla para lograr la regeneración natural para liberar su posterior y futura corta. Este método es aplicado para conducir a los bosques a su estado original hacia una estructura regular (Sánchez-Vaughan, 2021).

Objetivo general

Realizar una primera aproximación para el conocimiento de la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) en función del manejo silvícola que se aplica en las parcelas ubicadas en los municipios Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

Objetivos específicos

- Aislar las esporas de las muestras de suelo, contabilizar e identificarlas morfológicamente por morfotipo.
- Medir el pH y el porcentaje de materia orgánica de los suelos de la zona.
- Estimar la riqueza y la diversidad de la comunidad de HMA por manejo silvícola.

Métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica al norte del estado de Puebla y pertenece a la región Sierra Norte de Puebla; colinda con el estado de Hidalgo, hacia el oeste, y con el de Veracruz, hacia el sur. En el territorio predominan los climas templados, tales como el templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media C(w1)(w), templado subhúmedo con lluvias en verano C(w2) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano C(E)(w2) (Pérez, 2020).

De acuerdo con la CONAFOR, la región Chignahuapan-Zacatlán abarca más de la mitad de la superficie forestal y de la industria forestal del estado que se refleja en los altos volúmenes de cosecha anual. Los municipios que comprende esta región son Chignahuapan, Ahuazotepec, Aquixtla, Ixtacamaxitlán, Tetela de Ocampo, Huauchinango y Zacatlán (Jiménez-Valle, 2017) (Fig. 1).

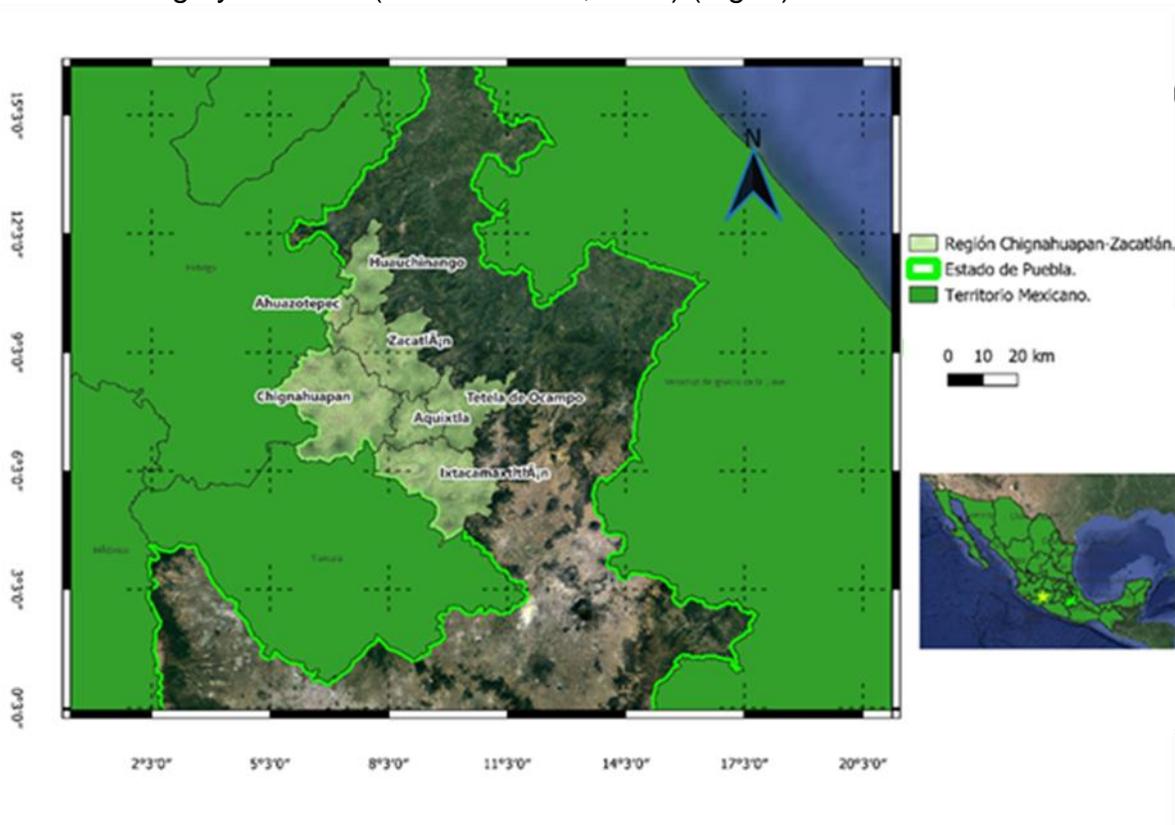


Figura 1. Mapa de la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, México.

Las muestras de suelo fueron tomadas en sitios ubicados en los municipios de Chignahuapan e Ixtacamaxitlán, en los ejidos Llano Grande (Fig. 2) y Minilla (Fig. 3), respectivamente; ambos municipios están ubicados al sureste de la región.

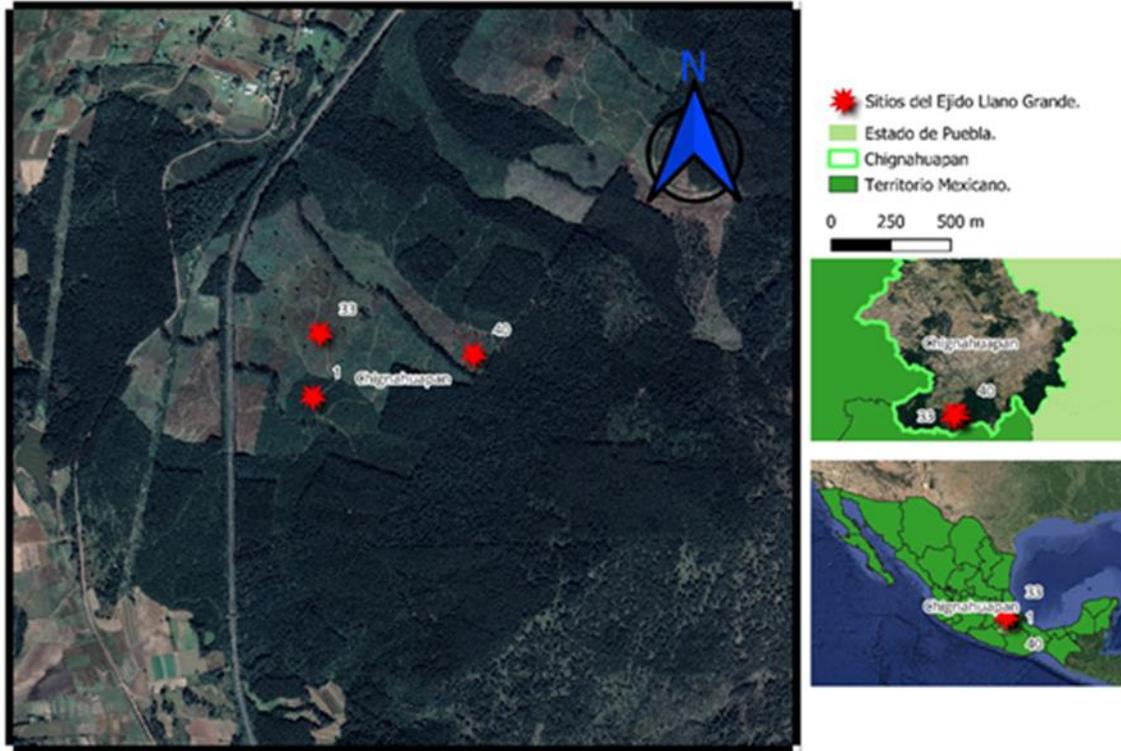


Figura 2. Mapa de las ubicaciones de los sitios de muestreo en el municipio de Chignahuapan.

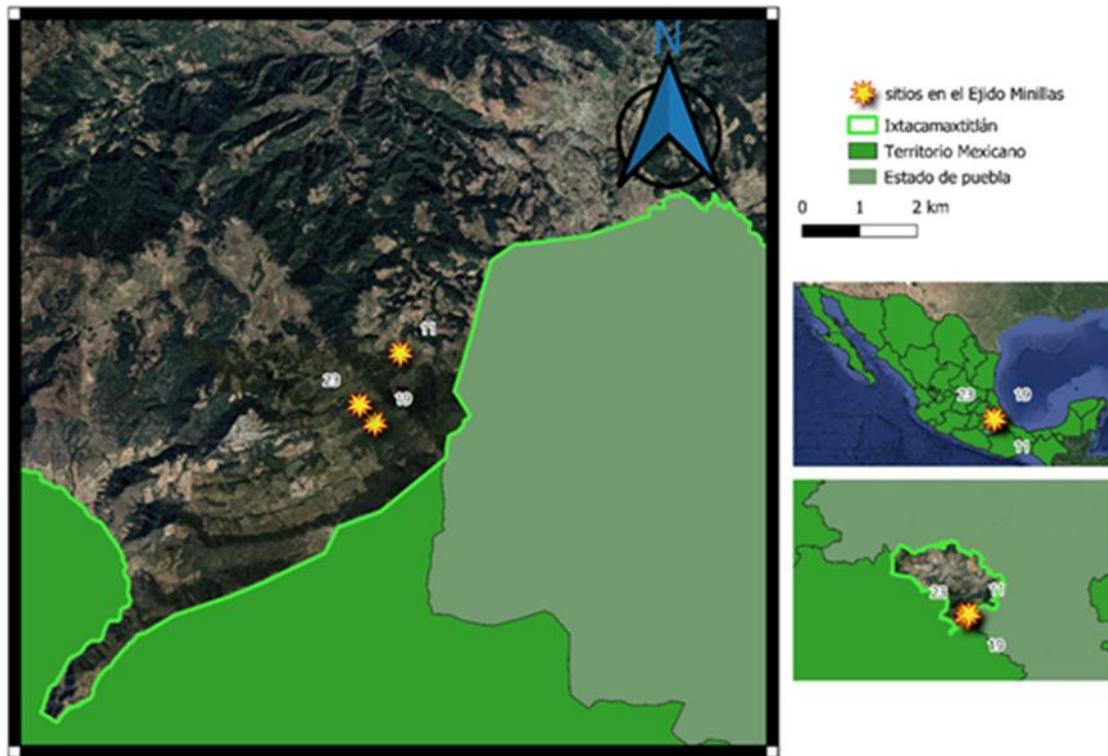


Figura 3. Mapa de las ubicaciones de los sitios de muestreo en el municipio de Ixtacamaxtitlán.

Respecto al uso de suelo y tipo de vegetación, de acuerdo con CONABIO, en el ejido Llano Grande predomina la vegetación de bosques de pino, mientras que en el ejido Minillas, predominan principalmente las actividades agrícolas y después están los bosques de oyamel como vegetación (Fig. 4).

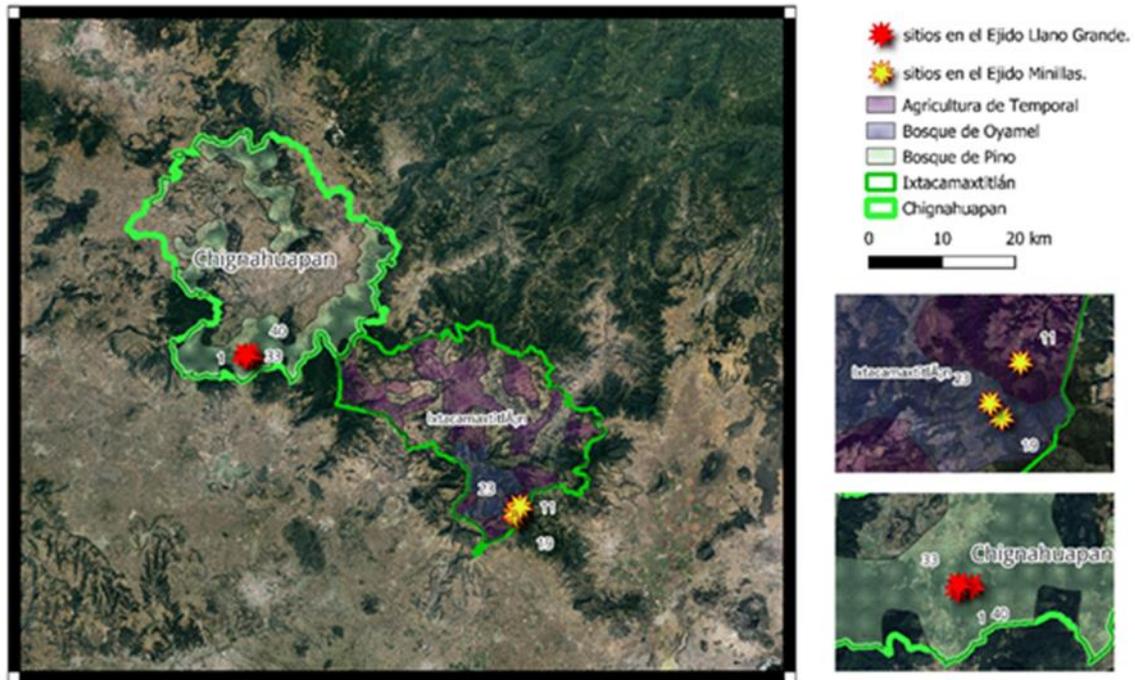


Figura 4. Mapa de vegetación y uso de suelo de los municipios de Chignahuapan e Ixtacamaxtitlán.

En los tipos de suelo se puede ver una dominancia, con relación a la ubicación de los sitios, de suelos de regosol éutrico en el ejido Minillas, y suelos de andosol húmico en el ejido Llano Grande (Fig. 5).

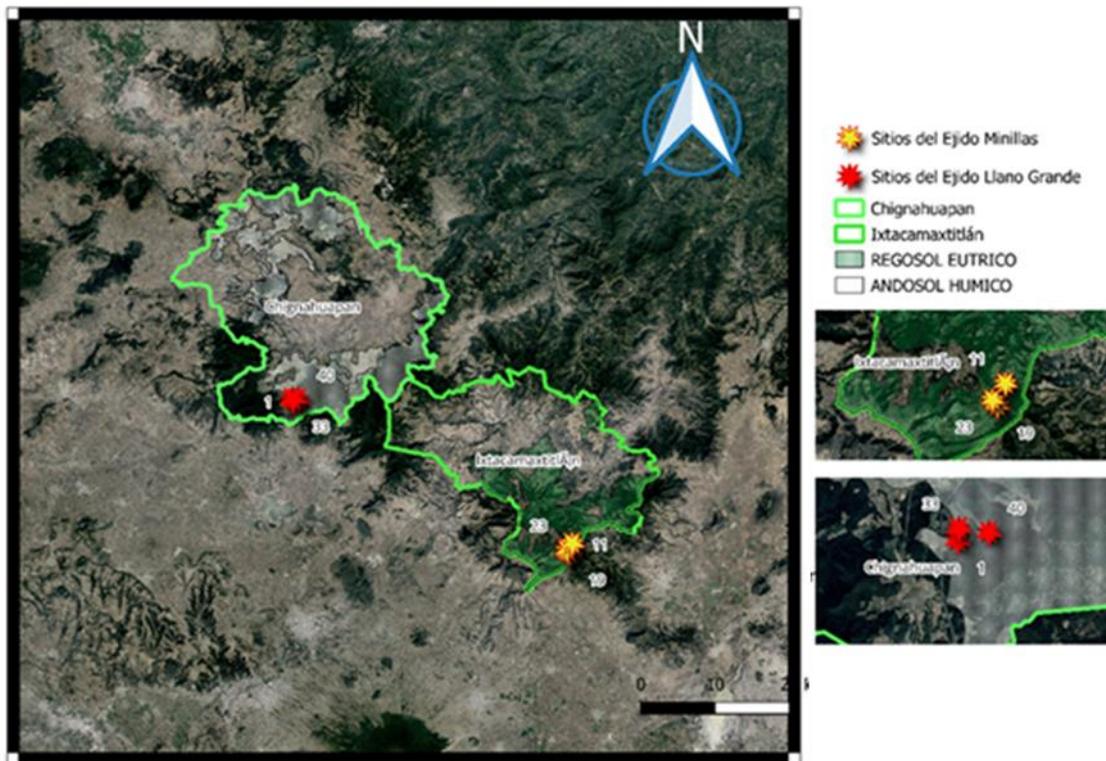


Figura 5. Mapa de los tipos de suelos predominantes de los ejidos Llano Grande y Minillas de los municipios de Chignahuapan e Ixtacamaxtitlán.

Elaboración de mapas

La elaboración de mapas se llevó a cabo con el software QGIS versión 3.28.1 para la descripción y zonificación del área de estudio. La representación gráfica del sitio de los mapas estuvo basada en el uso de metadatos de georreferencia del tipo de vegetación y uso de suelo, curvas de nivel, edafología, limitación territorial municipal y estatal. Los metadatos fueron extraídos del Geoportal de CONABIO.

Caracterización del suelo

La caracterización de los suelos consideró sólo realizar la toma de pH y el porcentaje de materia orgánica por muestra. Para estimar el pH se tamizaron 5 g de suelo de 24 muestras (se tomaron sólo las muestras pertenecientes a los cuadros 1, 2, 3 y 4 de cada sitio de los puntos 1); cada muestra se mezcló con 25 ml de agua deionizada en un agitador a una velocidad de 185 a 198 rpm/1.5 h, para después hacer la lectura en el potenciómetro previamente calibrado (Anexo 1).

Para calcular el porcentaje de materia orgánica, se aplicó el método de incineración, donde al igual que las muestras para tomar el pH, sólo se utilizaron

las 24 muestras anteriormente mencionadas considerando sólo el cuadro 1, 2, 3 y 4 de cada sitio. Primero, se tamizaron y pesaron 10 g de suelo en seco para ser depositados en crisoles de porcelana, y enseguida a la mufla durante 2 h a 600 °C. Finalmente se dejaron enfriar para manipular los crisoles; a continuación se pesaron y se calculó la diferencia para tener el porcentaje con la siguiente fórmula:

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \left(\frac{\text{peso}_i - \text{peso}_f}{\text{peso}_i} \right) (100)$$

Donde= peso inicial y peso_f = peso final

Cabe mencionar que no fue necesario realizar una salida a campo para obtener las muestras de suelo, sino que ésta se realizó en fechas anteriores.

Aislamiento y conteo de esporas

El aislamiento de esporas de HMA se llevó a cabo por el método modificado de decantado y tamizado en húmedo de Gerdemann y Nicholson (Sieverding, 1983). Se tamizaron 100 g de suelo seco para posteriormente ponerlos en un recipiente con 2 l de agua y mezclar de manera manual, procurando disgregar partículas de suelo o grumos grandes. Posteriormente, se centrifugó la muestra con agua corriente a 3500 rpm, se colectó el pellet y fue resuspendido en sacarosa al 40%; una vez bien mezclado se centrifugó a 3500 rpm y se decantó el sobrenadante en un tamiz de 400 µm de abertura de malla. De aquí, el contenido fue vaciado en una caja Petri, donde bajo el microscopio estereoscópico se colectaron todas las esporas encontradas, fueron depositadas en un portaobjetos y montadas con PVLG con y sin solución Meltzer (Núñez-Ramos, 2021).

Caracterización morfológica y conteo de esporas

Para el conteo y la caracterización de morfotipos, se utilizó un microscopio óptico para tomar fotografías de las esporas vistas con los objetivos 40X y 100X. A continuación, se compararon las características morfológicas visualizadas con registros, fotografías, así como artículos, bases de datos y publicaciones de plataformas en internet (INVAM, IDIV, Zor). También, se contaron las esporas por muestra realizando un registro de fotos, basándose en el número de observaciones de esporas idénticas a las fotos anteriormente tomadas y registradas para crear una base de datos en una hoja de Excel para su posterior análisis e identificación. Finalmente, se creó un registro con evidencias fotográficas de los morfotipos identificados (Anexo 2).

Estadística

Posterior al conteo y la caracterización morfológica de las esporas de HMA, se estimó la abundancia relativa, y se calcularon los valores de diversidad. Los índices que se estimaron son los siguientes:

El índice de Shannon-Wiener (H') el cual estima la diversidad de especies en una comunidad. Este índice tiene en cuenta tanto la riqueza de especies (el número de especies presentes) como la abundancia relativa de cada una.

$$H' = - \sum (p_i (\ln p_i))$$

p_i : es la abundancia de cada especie, y para calcular p_i se utilizó $p_i = n_i / N$, donde n_i es el número de esporas de una especie y N es el número total de esporas de todas las especies (Cruz, 2016).

El índice de equitabilidad de Pielou (J') indica si todas las especies en una muestra presentan la misma abundancia. Fluctúa entre 0 y 1, siendo 1 la máxima equitabilidad. La fórmula aplicada fue:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Donde H' es el índice de Shannon-Wiener, H'_{max} representa el logaritmo natural del total de especies encontradas (Cruz, 2016).

Para conocer la similitud/disimilitud de la composición de especies de las comunidades de HMA, se utilizó el coeficiente de Bray-Curtis que representa el grado de cambio o reemplazo de especies entre comunidades, utilizando:

$$IB - C = \frac{2N}{(aN + bN)}$$

donde aN : número de esporas en la comunidad A,

bN : número de esporas en la comunidad B (Cruz, 2016).

Por último, se utilizó el Abundance-based coverage estimator (ACE) para estimar el número real de especies entre abundantes y raras (O'Hara, 2005) de acuerdo con el número de observaciones por sitio. Este estimador fue calculado con un paquete estadístico (PAST).

Los índices de diversidad fueron calculados con el programa PAST 4.13.

Actividades Realizadas

- Se ha consultado información de fuentes web respecto a la sistemática, morfología, nomenclatura y clasificación de especies de hongos micorrizógenos arbusculares con el fin de empezar a familiarizarse en la identificación de estos hongos.
- Se pesó y tamizó en seco todas las muestras de suelo de 100 g a procesar, extrayendo esporas de un total de 24 muestras.
- Para la extracción y montaje de esporas, se utilizó un microscopio estereoscópico, agujas entomológicas, pipetas Pasteur y tamices para la separación. Ya con las esporas separadas, se procedió a montarlas en portaobjetos, distribuyéndolas en dos secciones por portaobjeto, uno con PVLG y otro con solución Melzer, con el motivo de ver si hay reacciones en las esporas y poder diferenciar entre géneros o especies.
- También, y como parte de la formación del servicio social, se apoyó en la extracción de esporas a otra estudiante.
- Con apoyo del microscopio óptico, se tomaron fotografías con una graduación 40X y 100X de las esporas montadas y vistas en las muestras extraídas, teniendo como resultado un total de 573 fotografías de 39 muestras (recordando que en total fueron 42 muestras en un principio, sin embargo, 3 muestras no contaban con ninguna espora).

- A la par con la actividad anterior, también se contaron las esporas vistas en el microscopio óptico cuyos datos fueron capturados en una hoja de cálculo de Excel para su posterior análisis; contando con 644 registros.
- Con las fotos tomadas se hicieron comparaciones entre las fotos de cada sitio con el motivo de diferenciar las características morfológicas y posteriormente, con el apoyo de compañeras del laboratorio, estudios de filogenia y taxonomía, se identificaron 144 morfotipos de HMA; con lo anterior se elaboró una tabla donde se expone el número de morfotipo, familia, género, foto 40X, foto 100X y foto en Meltzer.
- Se elaboraron 5 mapas en el software QGis para la caracterización del área de donde fueron recolectadas las muestras y para describir la región de Chignahuapan-Zacatlán.
- Se utilizó el software Past versión 4.13, para el análisis estadístico de los datos acomodados de la hoja de Excel, donde se calculó el índice de Shannon-Wiener, el índice de equitabilidad de Pielou y el coeficiente de Bray-Curtis.

Metas Alcanzadas

- Se extrajo y se aislaron esporas de hongos micorrizógenos arbusculares para su posterior identificación morfológica.
- Se identificaron 122 morfotipos de 573 fotografías para clasificarlos por género y familia.
- Se contaron esporas para determinar su abundancia, quedando registrada en una base de datos.
- Se cuantificó el porcentaje de materia orgánica y pH como variantes que influyen cambios en las comunidades de HMA.
- Se realizó un análisis estadístico comparando los tratamientos silvícolas de los dos métodos de manejo para evaluar su efecto sobre la composición, la abundancia y la riqueza de los HMA.

Resultados

Se identificaron 122 morfotipos de HMA entre los dos manejos silvícolas: en el Método de Manejo Silvícola (MDS) se registraron 67 morfotipos, mientras que en el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) fueron determinados 55 morfotipos. Taxonómicamente, se identificaron 11 géneros, 7 familias, 3 órdenes (Tabla 2) en los dos métodos de manejo silvícola, donde los géneros *Glomus* y *Acaulospora* predominaron en ambos (Tabla 1).

Tabla 1. Número de Morfotipos identificados por género en cada uno de los tratamiento silvícolas analizados del Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI).

Género	morfotipos MDS			Género	morfotipos MMOBI		
	CRT	CLF	SAF		temp	int	tard
<i>Acaulospora</i>	17	8	7	<i>Acaulospora</i>	7	5	8
<i>Ambispora</i>	1	0	0	<i>Dentiscutata</i>	0	0	1
<i>Diversispora</i>	3	1	2	<i>Diversispora</i>	0	1	2
<i>Entrophospora</i>	2	3	0	<i>Entrophospora</i>	0	1	3
<i>Funneliformis</i>	0	1	0	<i>Funneliformis</i>	0	0	1
<i>Gigaspora</i>	3	2	0	<i>Gigaspora</i>	1	2	4
<i>Glomus</i>	13	14	6	<i>Glomus</i>	4	14	16
otros	12	12	2	otros	10	8	10
<i>Pacispora</i>	1	1	0	<i>Pacispora</i>	1	0	1
<i>Rhizophagus</i>	2	1	0	<i>Rhizophagus</i>	0	1	1
<i>Sclerocystis</i>	2	2	1	<i>Sclerocystis</i>	1	1	1
<i>Scutellospora</i>	3	5	3	<i>Scutellospora</i>	1	2	5

Tabla 2. Morfotipos y su ubicación taxonómica en orden, familia y género según las características morfológicas. ID representa la seriación que vincula los morfotipos identificados con las fotos de la tabla del Anexo 2.

Orden	Familia	Género	ID
<i>Archaeosporales</i>	<i>Ambisporaceae</i>	<i>Ambispora</i>	17111
Diversisporales	<i>Acaulosporaceae</i>	<i>Acaulospora</i>	5111
			121912
			251131
			1111
			31113
			103311
			6111
			94011
			21114
			31921
			131141
			73313
			1124
			293314
			161111
			20111
			42314
	111111		
	151114		
	22124		
	21141		
	7111		
	12111		
	22111		
	21912		
	134021		
	91113		
	71111		
	71112		
	71911		
34014			
9112			
193331			
102321			
24023			
3124			

			91114
			14011
			73341
			191111
			11121
			181112
	Pacisporaceae	<i>Pacispora</i>	11141
			8111
		<i>Funneliformis</i>	13321
			223331
			13331
			233331
			41913
			21911
			231112
			124021
			11931
			4112
			23312
			83311
			3114
			61112
			303321
Glomerales	Glomeraceae	<i>Glomus</i>	13111
			4111
			11114
			10114
			9121
			31111
			221131
			5124
			23311
			143321
			15114
			43311
			21113
			161114
			43314

			27111
		<i>Rhizophagus</i>	111914
			313331
			11111
		<i>Sclerocystis</i>	42313
			73312
			93312
			73331

El MDS comprende tres tratamientos de manejo silvícola denominados Corta de Regeneración Total (CRT), correspondiente a un tratamiento de bosque de crecimiento temprano; Corta de Liberación Final (CLF), referente a un tratamiento de bosque de crecimiento intermedio, y el Segundo Aclareo Final (SAF), correspondiente a un tratamiento de crecimiento tardío. Se puede notar que dentro de los tres tratamientos hubo una predominancia en abundancia de esporas de los géneros *Glomus* y *Acaulospora*. Globalmente, en el tratamiento CRT se apreció una mayor abundancia de esporas que en el resto de los tratamientos. Cabe destacar que el tratamiento SAF presentó la menor abundancia de esporas y géneros. Respecto a la presencia de morfotipos en el MDS, hubo una mayor presencia de morfotipos en el tratamiento CRT y los de menor presencia los del tratamiento SAF (Figura 6).

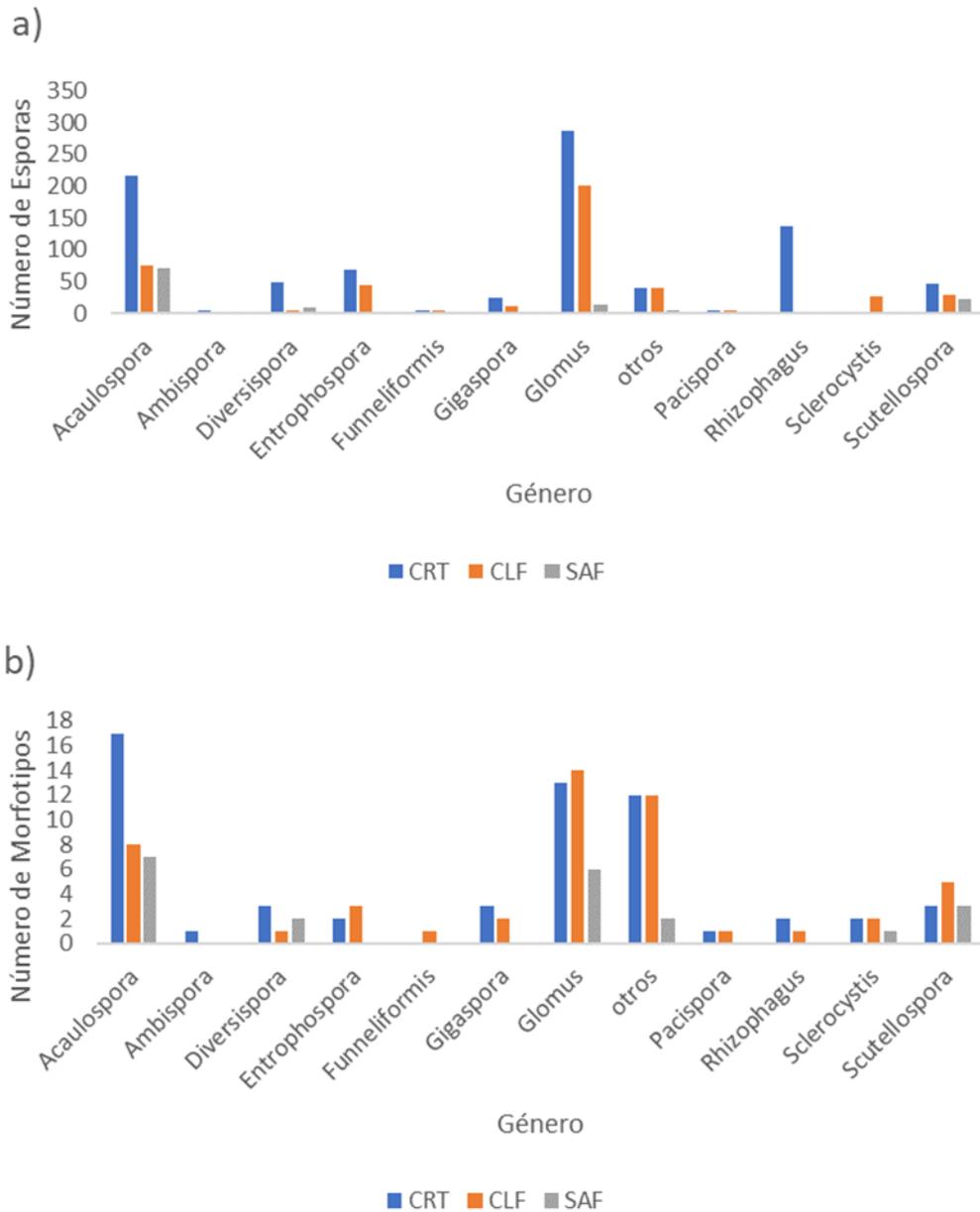


Figura 6. Número de esporas observadas y morfotipos por género en cada tratamiento, donde las barras azules corresponden al CRT, las naranjas al CLF y las grises al SAF.

Los datos del MMOBI se dividieron en tres tratamientos de manejo silvícola igual que el anterior, los de crecimiento temprano (Temp), de crecimiento intermedio (Int) y de crecimiento tardío (Tard). Hubo una mayor abundancia de esporas y número de morfotipos del género *Glomus* en el tratamiento Tard, a diferencia de los otros (Figura 7).

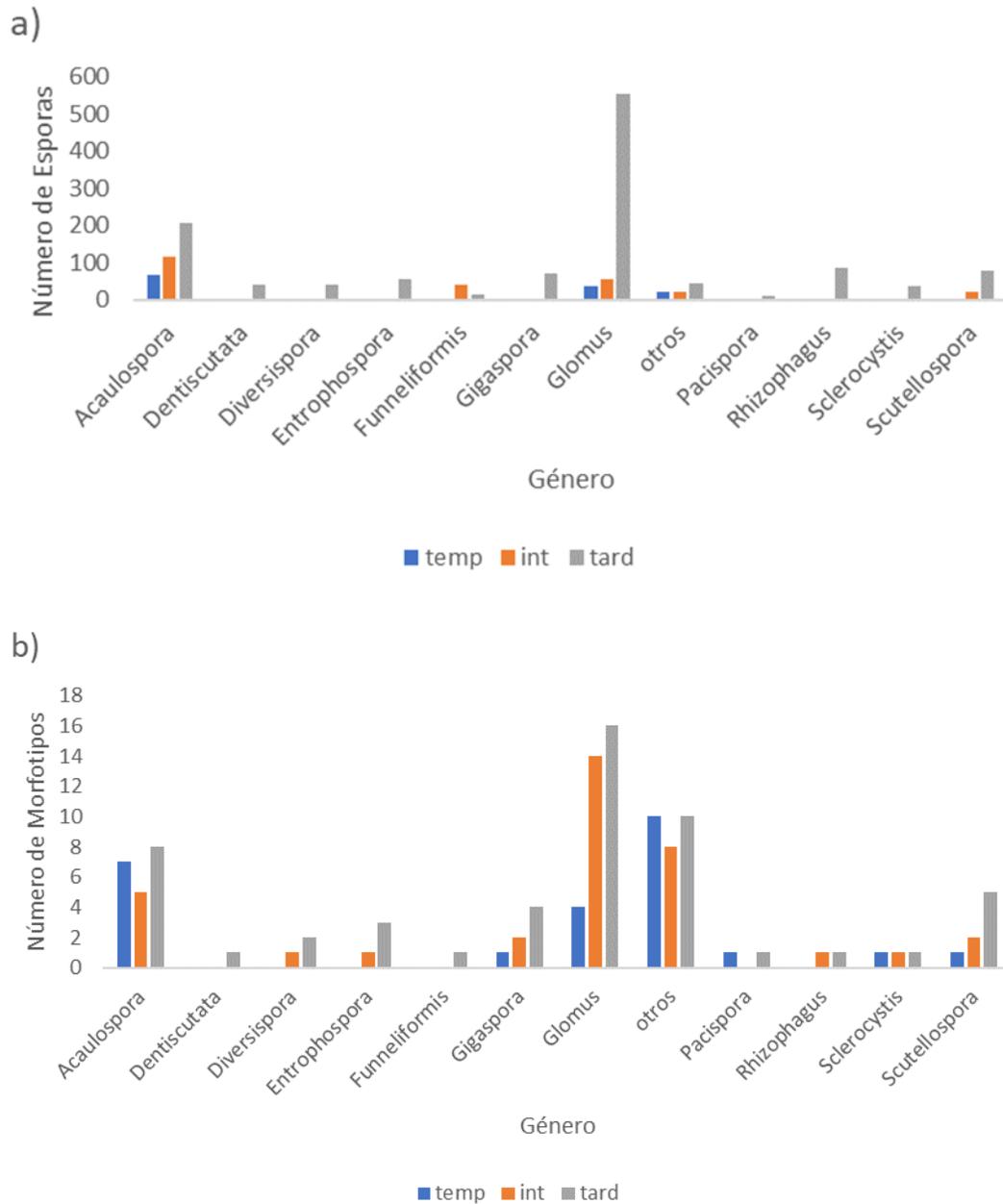


Figura 7. Número de esporas observadas y morfotipos por géneros en cada tratamiento. Las barras azules corresponden al temp, las naranjas al int y las grises al tard.

También se puede apreciar de manera general que hubo una mayor diversidad y equitatividad de especies en el Tard del MMOBI y en el CLF del MDS. Los tratamientos con menor diversidad y equitatividad fueron el Int y el SAF de los métodos correspondientes (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios de los índices de Shannon-Wiener (H'), de equitatividad de Pielou (J') y del índice Estimador de cobertura basado en abundancia (ACE) en cada tratamiento de los manejos silvícolas.

Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI)									
Tratamiento	H'			ACE			J'		
temp	1.4798	±	0.3012	8.162	±	2.6319	0.8666	±	0.8666
inter	1.1566	±	0.4633	10.415	±	5.0152	0.5307	±	0.5307
tard	2.2745	±	0.1562	17.315	±	2.8574	0.84685	±	0.84685

Método de Desarrollo Sílícola (MDS)									
Tratamiento	H'			ACE			J'		
CRT	1.7298	±	0.5916	15.0125	±	5.6628576	0.604725	±	0.2019
SAF	1.5233	±	0.2461	8.6525	±	2.2088284	0.99345	±	0.1352
CLF	2.3943	±	0.1954	17.365	±	3.95922657	0.90395	±	0.0236

Índices de diversidad y estimación de riqueza de especies de los tratamientos del MMOBI

En los sitios del MMOBI se puede apreciar que hubo una mayor diversidad en el sitio 1 ($H= 2.3$), mientras que el sitio con mayor estimación de especies basado en la abundancia observada fue el sitio 3 del Tard ($ACE= 24$). Respecto a la equitatividad, el sitio 3 del Temp fue el que tuvo el mayor valor ($J' = 0.9$)(Figura 8).

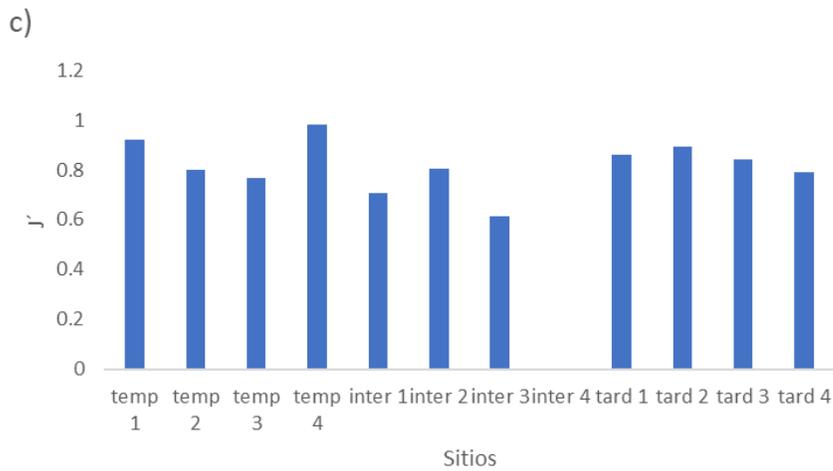
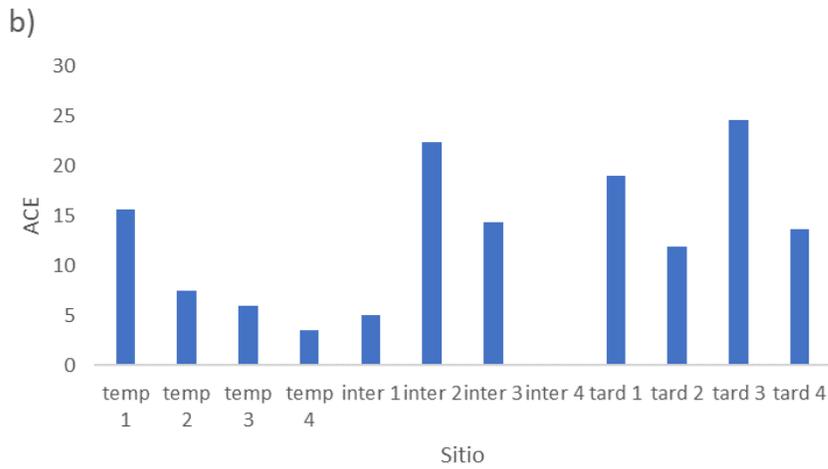
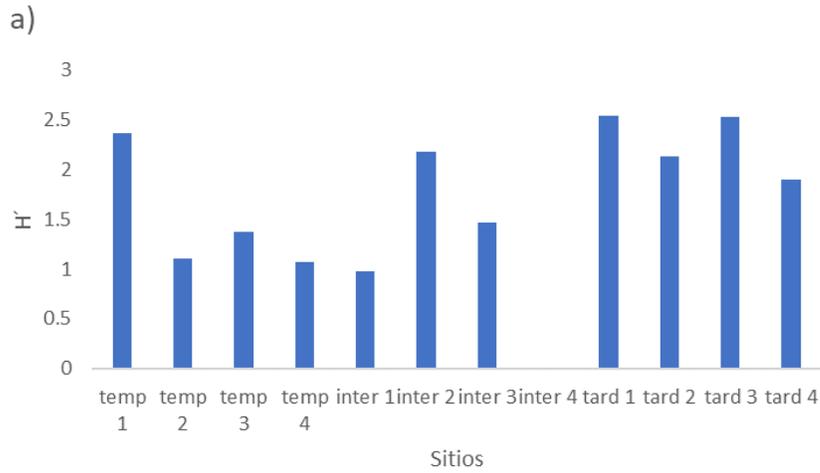


Figura 8. Índices de a) diversidad de Shannon-Wiener, b) estimador de cobertura basado en abundancia y c) equitatividad de Pielou de cada sitio de los tratamientos del MMOBI.

La variabilidad de los datos fue alta en cuanto a la diversidad, no así para la estimación de especies y equitatividad (Figura 9). Esto puede deberse a que dicho índice estima el número de especies de acuerdo con la abundancia observada, y no se basa en el número de especies observadas en un sitio. En general, hubo una mayor diversidad de morfotipos en el tratamiento Tard; el número de morfotipos estimados por sitio basándose en la abundancia de esporas varió entre sitios y la equitatividad entre sitios no varió mucho.

Índices de diversidad y estimación de riqueza de los tratamientos del MDS por sitio

En los sitios del MDS hubo una mayor diversidad en el sitio 2 del tratamiento CLF ($H' = 2.8$), mientras que el sitio 2 del CRT tuvo una mayor estimación de morfotipos, y los sitios 3 y 4 del SAF presentaron una mayor equitatividad (Figura 10).

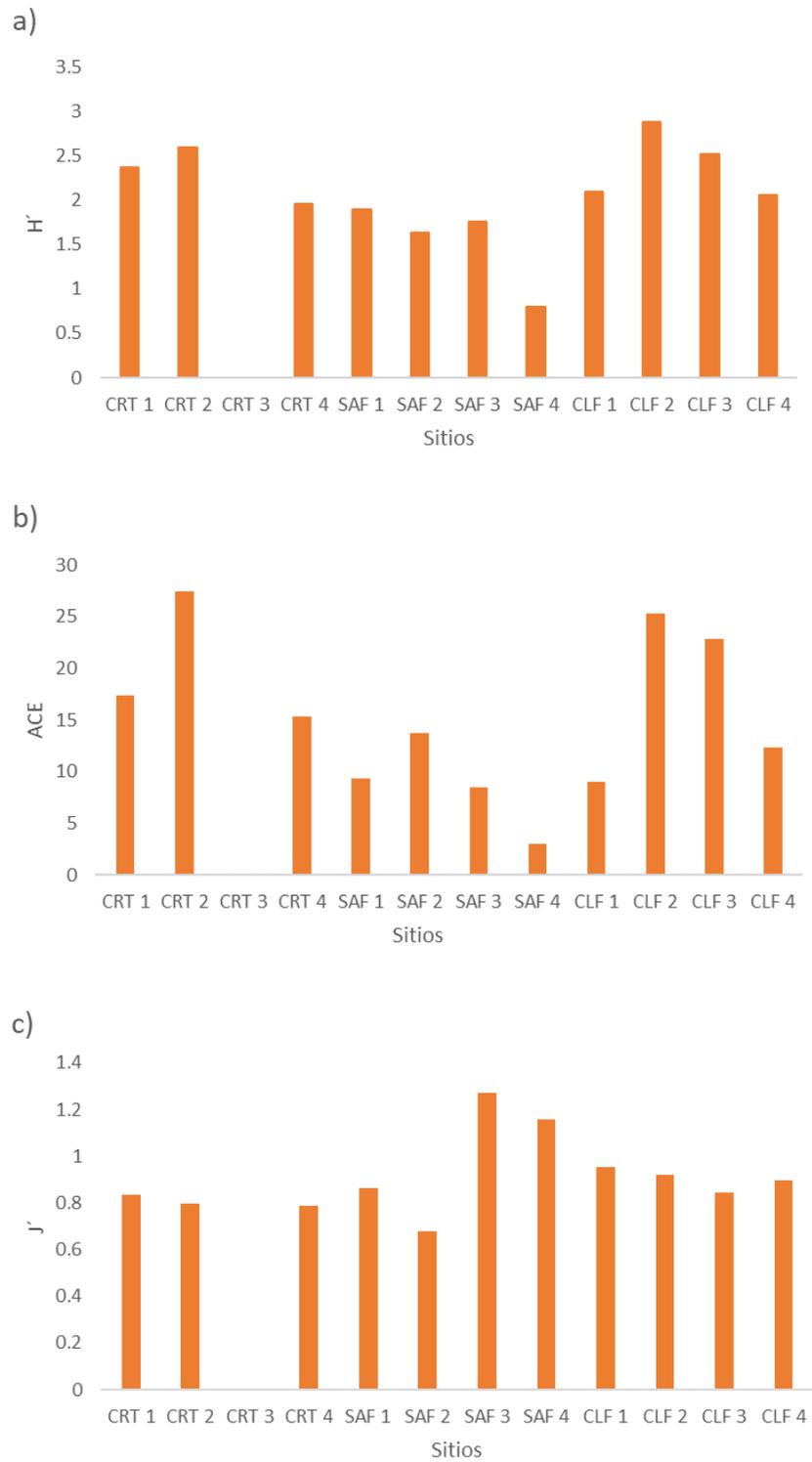


Figura 10. Índices de a) diversidad de Shannon-Wiener, b) estimador de cobertura basado en abundancia y c) equitatividad de Pielou de cada sitio de los tratamientos del MDS.

Respecto a la variabilidad de los datos de los sitios, al igual que el MMOBI, hubo una gran dispersión de datos de ACE por sitio, en contraste con el conjunto de datos de equitatividad y diversidad. Los datos correspondientes a la equitatividad presentaron una nula dispersión (Figura 9). En general, el MMOBI mantuvo una mayor diversidad de morfotipos en los sitios correspondientes al tratamiento CLF. En la estimación de morfotipos hubo una gran variación entre los sitios de los tres tratamientos, mientras que la equitatividad en los sitios de los tres tratamientos representó una homogeneidad entre ese conjunto de datos.

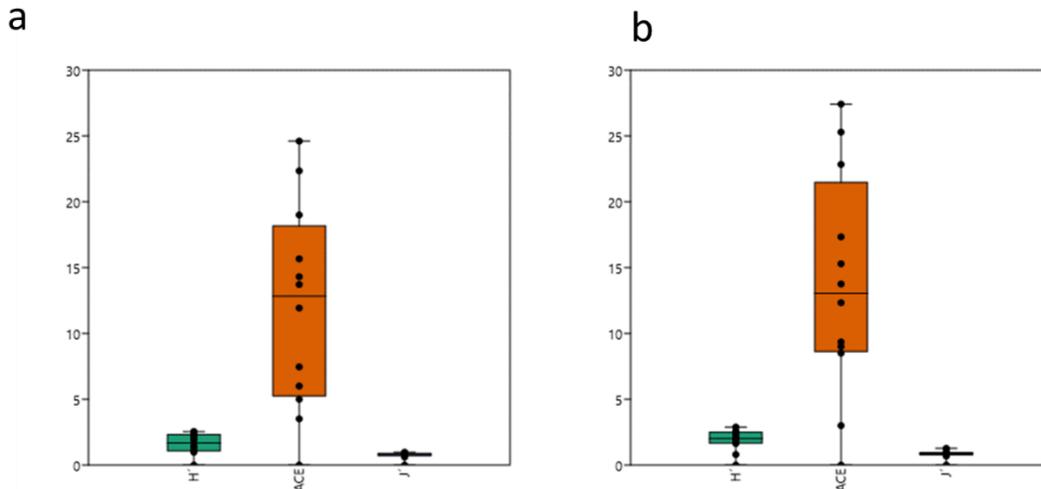


Figura 9. Gráficos de caja y bigote que muestran la dispersión de datos de cada índice estimado para el a) MMOBI y b) MDS.

Influencia del pH, y porcentaje de materia orgánica (MO) en la abundancia, riqueza y diversidad de HMA en el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y en el Método de Desarrollo Silvícola (MDS)

Se determinaron el pH y el porcentaje de materia orgánica (MO) de las muestras de suelo procedentes de los respectivos métodos silvícolas. Dichos registros se pueden ver en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de pH y MO de cada sitio de los métodos silvícolas.

Método de Desarrollo Silvícola (MDS)			Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI)		
Muestras	MO	Ph	Muestras	MO	Ph
CRT 1	29.61	5.22	Temp 1	42.77	5.18
CRT 2	2.89	4.81	Temp 2	31.21	5.35
CRT 3	29.41	5.1	Temp 3	28.12	6.13
CRT 4	36.09	4.7	Temp 4	48.06	5.03
CLF 1	16.15	5.76	Inter 1	12.56	5.11
CLF 2	17.25	5.5	Inter 2	13.72	5.32
CLF 3	28.12	5.29	Inter 3	6.68	4.71
CLF 4	26.22	4.94	Inter 4	46.36	4.92
SAF 1	24.63	5.31	Tard 1	21.44	5.61
SAF 2	31.70	4.88	Tard 2	24.23	5.35
SAF 3	21.34	4.87	Tard 3	19.74	5.48
SAF 4	27.42	5.18	Tard 4	8.28	6.03

En relación con el MMOBI, los análisis de regresión lineal entre la MO con respecto al número de esporas ($F=4.8357$, $P= 0.0525$), el número de morfotipos ($F= 3.7022$, $P=0.0847$) y la diversidad ($F=1.7369$, $P=0.2243$) indican que no hubo relaciones significativas entre la MO y estas variables de respuesta.

Los análisis de regresión en el MMOBI entre el pH y el número de esporas ($F=2.1055$, $P=0.1774$), el número de morfotipos ($F=1.536$, $P=0.2365$) y la diversidad ($F= 2.0394$, $P=0.1837$) tampoco presentaron relaciones significativas (Figura 11).

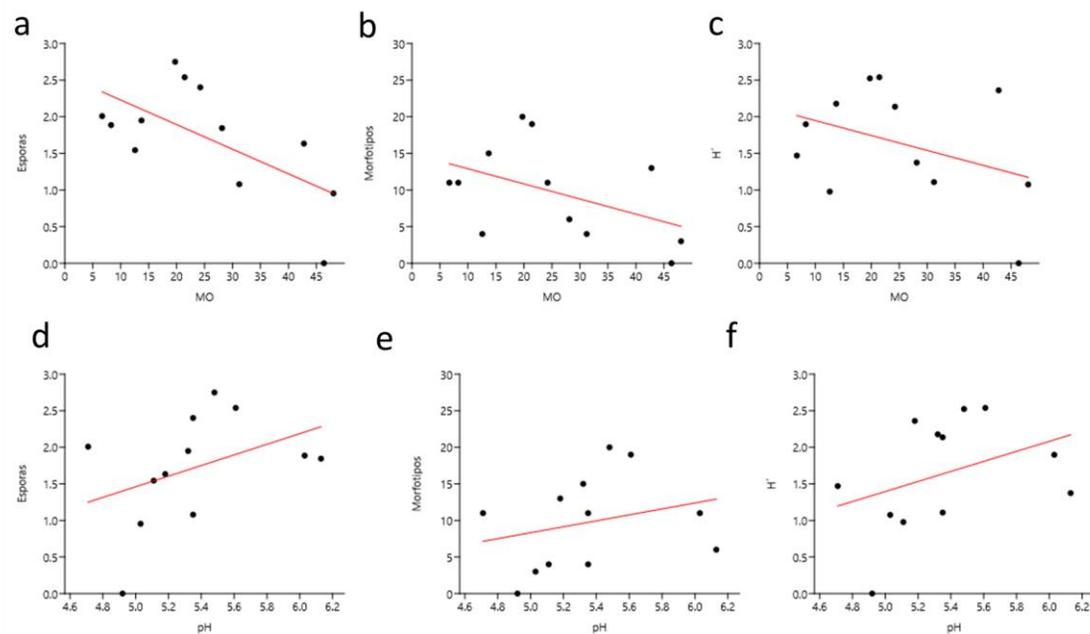


Figura 11. Relaciones entre materia orgánica (MO) y las a) esporas, b) morfotipos y c) diversidad de especies, así como entre el pH y las d) esporas, e) morfotipos y f) diversidad de especies del MMOBI.

En el MDS, el análisis de regresión entre la MO con respecto al número de esporas ($F=1.6197$, $P=0.2319$), cantidad de morfotipos ($F=1.2109$, $P=0.2969$) y diversidad de especies ($F=0.5981$, $P=0.4571$) presentó el mismo comportamiento que en el caso del MMOBI.

En el caso del pH, tampoco se encontraron relaciones significativas con ninguna de las variables de respuesta (esporas $F=0.1267$, $P=0.2707$) (número de morfotipos $F=0.1765$, $P=0.3167$) (diversidad $F=0.0492$, $P=0.1711$) (Figura 12).

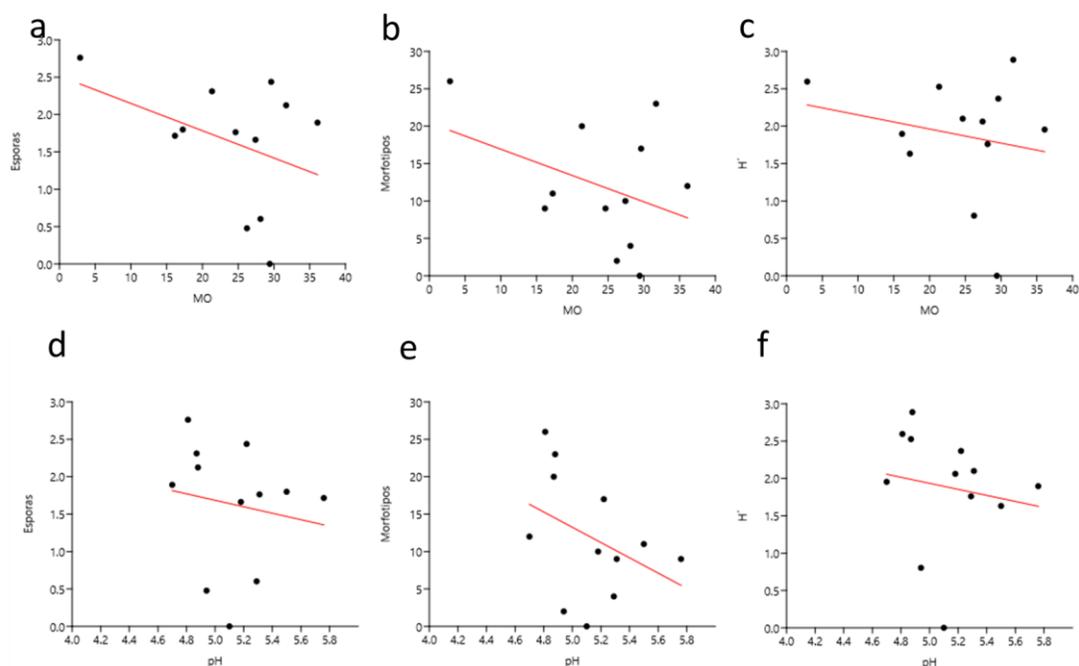


Figura 12. Relación entre MO y las a) esporas, b) morfotipos y c) diversidad de especies, así como entre el pH y las d) esporas, e) morfotipos y f) diversidad de especies del MDS.

Diferencias entre tratamientos del MDS y MMOBI

Se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis para identificar diferencias entre los tratamientos al interior de cada uno de los manejos (MDS y MMOBI) con respecto a las variables de respuesta analizadas (número de esporas y de morfotipos y la diversidad), así como las variables abióticas (MO y pH) (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación entre los tratamientos del manejo silvícola (MDS y MMOBI) para las variables analizadas (* $p < 0.05$).

Factor	Esporas		Morfotipos		MO		pH		H'	
	H	p	H	p	H	p	H	p	H	p
MMOBI	6	*	3.529	0.166	4.885	0.0869	5.837	0.0534	4.308	0.116
MDS	2.423	0.2977	2.625	0.2679	1.654	0.4374	3.962	0.138	5.115	0.0774

Con una excepción, no se apreciaron diferencias significativas entre los tratamientos de cada método silvícola en cuanto a la abundancia de esporas, riqueza, diversidad y sus variables abióticas en los tratamientos de cada método de manejo silvícola. En el tratamiento MMOBI y la abundancia de esporas, se observó una diferencia marginal ($P=0.0497$). Posteriormente se realizó una prueba de Dunn post hoc para identificar los tratamientos en los que hay una diferencia de medias; los tratamientos Tard y Temp fueron diferentes significativamente ($P=0.0186$).

Similitud de la composición de especies entre los sitios de los tratamientos del MMOBI y MDS

Al comparar la composición entre las diferentes condiciones de cada tratamiento silvícola, se observa que se formaron dos grupos, donde los sitios con mayor similitud fueron los sitios Temp 2 e Inter 1 de un grupo, mientras que en el otro grupo los que tuvieron una similitud total fueron los sitios Inter 3, Tard 2 y Tard 4. Los sitios que más difirieron entre los dos grupos formados fueron los sitios Temp 3 en un grupo, y Tard 1 y Tard 3 en el otro grupo (Figura 13).

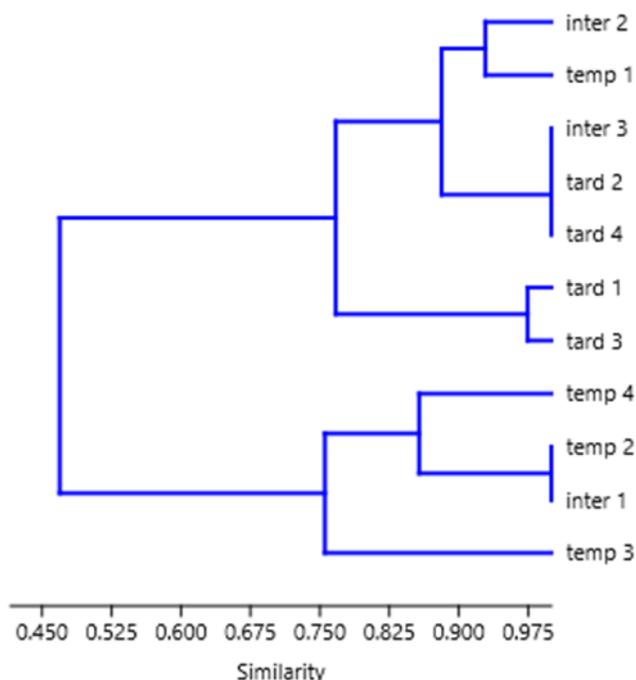


Figura 13. Dendrograma de las similitudes en la composición de especies entre sitios de los tratamientos del MMOBI, donde se utilizó el índice de similitud de Bray-Curtis.

En el MDS, al igual que el MMOBI, los sitios se dividieron en dos grupos donde aquellos que tuvieron una similitud mayor fueron los sitios SAF 1 y CLF 1, mientras que los sitios que menos mostraron similitud fueron SAF 3 y SAF 4 (Figura 14).

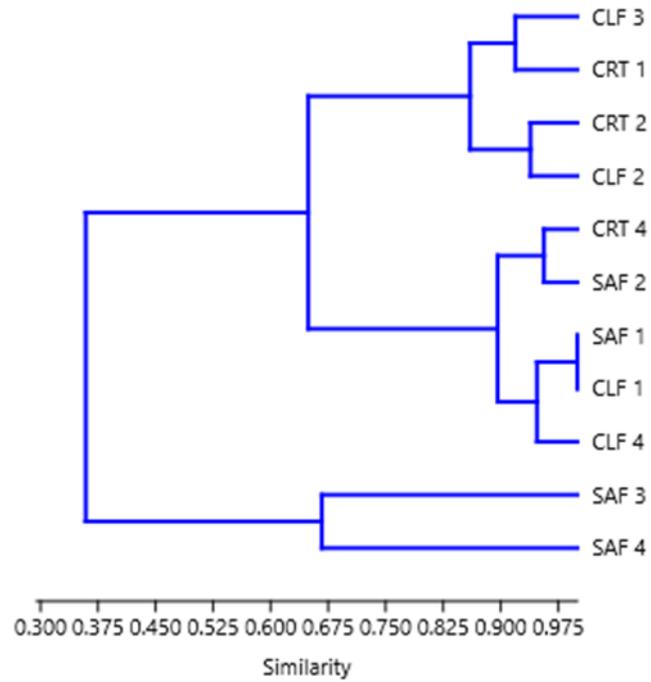
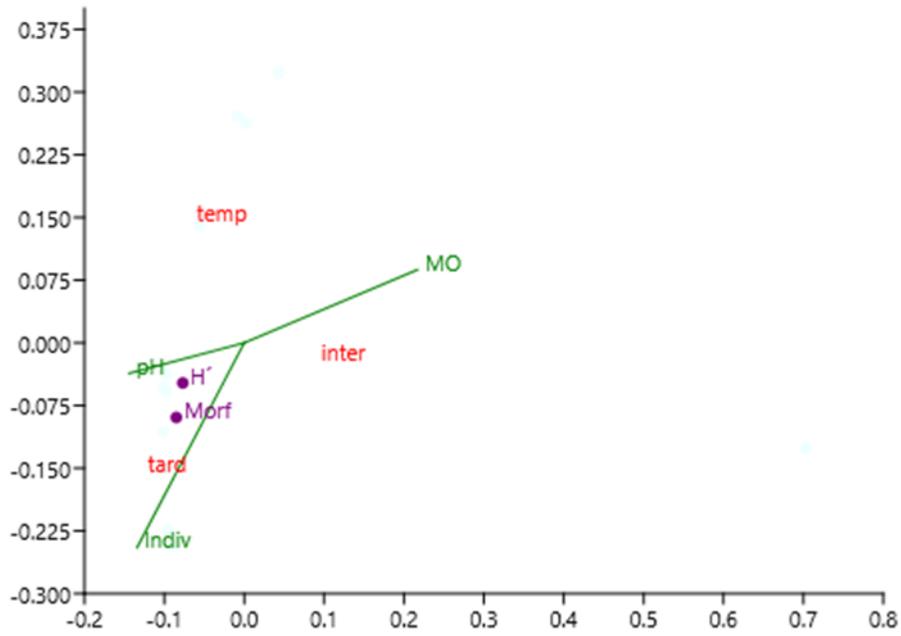


Figura 14. Dendrograma de las similitudes en la composición de especies entre sitios de los tratamientos del MDS, donde se utilizó el índice de similitud de Bray-Curtis.

Escalamiento multidimensional no métrico (NMDS)

En el caso de la ordenación para los sitios de los tratamientos del MMOBI, el Tard se caracterizó por tener sitios con la mayor abundancia de esporas, morfotipos y diversidad de especies, así como con el menor porcentaje de materia orgánica y un pH menos ácido. El Inter y Temp tendieron a tener menor abundancia de esporas, morfotipos y diversidad de especies cuando hubo mayor cantidad de MO y un pH más ácido. En el NMDS, la ordenación representa que hubo más abundancia de esporas, morfotipos y diversidad de especies en los sitios del CRT y parte del CLF, mientras que los sitios del SAF y parte del CLF se caracterizaron por tener una mayor cantidad de MO y pH, con menor cantidad de esporas (Figura 15).

a



b

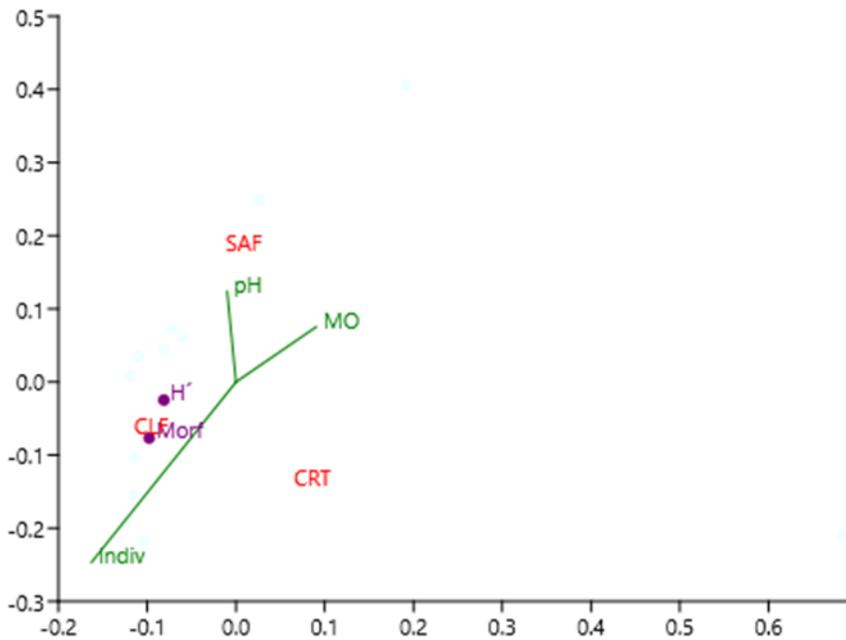


Figura 15. Gráficos de NMDS (non metric dimensional scaling) del a) MMOBI y b) MDS.

Discusión y conclusiones

Los resultados muestran que hubo una dominancia en general entre los dos métodos silvícolas (MDS y MMOBI) de morfotipos identificados con los géneros *Glomus* y *Acaulospora*. De acuerdo con Peralta-Valencia (2023), las familias de estos géneros tienden a mostrar una respuesta a la tolerancia de un alto estrés y disturbio; *Acaulospora* tolera pH más ácido que *Glomus*, y éste último resiste una mayor cantidad de disturbios en el suelo como podría ser una elevada cantidad de materia orgánica (Wang et al., 1993). En los sitios sometidos al Método de Desarrollo Silvícola (MDS), hubo una mayor riqueza de morfotipos del género *Glomus* en los tratamientos de Corta de Regeneración Total (CRT) y de Corta de Liberación Final (CLF), y *Acaulospora* en los sitios del tratamiento del Segundo Aclareo Final (SAF). En el sitio CLF hubo una mayor diversidad de especies por lo que se podría interpretar que los sitios de los tratamientos CRT y SAF podrían mostrar un disturbio acorde con las condiciones del suelo que afectaron la diversidad de esporas. Es muy notable la abundancia de individuos y la riqueza de morfotipos de *Glomus* y *Acaulospora*, lo que se podría interpretar como un indicador de estrés y disturbio en los sitios de los tratamientos anteriormente mencionados. Por otro lado, hubo muchas similitudes entre CLF y CRT respecto a la composición de especies en los sitios, considerando la dominancia de *Glomus* en el CRT y de *Acaulospora* en el SAF. Se espera una alta concentración de MO en el CRT y un pH ácido en los suelos del SAF, por lo que se visualizaría un mayor disturbio; esto se ve reflejado en que los sitios del SAF tendieron a ser más ácidos con una menor riqueza de especies, abundancia y diversidad; una vez ya planteado el argumento de considerar a los géneros *Glomus* y *Acaulospora* como indicadores de disturbios y suelos ácidos, basado en los argumentos de Peralta-Valencia (2023) y Wang et al. (1993). Se esperaría que los tratamientos del MMOBI presentaran disturbios como los sitios del tratamiento de corta tardía (Tard), pero este último tendió a una diversidad de especies muy alta a diferencia de los demás tratamientos. Tard se caracterizó por tener un pH muy ácido, con una mayor abundancia y riqueza de especies en general, a diferencia de los demás tratamientos que presentan menor pH y MO, y a la par, menor abundancia y riqueza. Esto conlleva a considerar la posibilidad de otras variables que influyen en la composición de las comunidades en estos tratamientos. Probablemente, lo anteriormente mencionado con los tratamientos del MMOBI, se pueda ver relacionado con lo que Sánchez-Vaughan (2021) considera del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), ya que este lleva la corta de selección (qué árboles cortar) para suprimir o maximizar el corte con el fin de cultivar los bosques recalculando la intensidad de corta por cada rodal (la cantidad de árboles talados), de acuerdo con el valor de su incremento, tomando en cuenta que cortan arboles de cierto diámetro. Por lo que, dicho de otro modo, probablemente en los demás sitios se cortó más de lo debido, dejando pocos árboles en pie para la próxima regeneración y a la vez afectando el sotobosque.

Por otro lado, Davison et al. (2021) determinaron que tanto el pH como la MO tienen relación con la composición de especies de HMA; en el MDS y MMOBI no hubo una relación entre la abundancia de esporas, riqueza de especies y

diversidad con el pH ni con la MO. Esto puede ser evidente ya que los niveles de disturbio y estrés mencionados antes son menores en estas condiciones, sin embargo, se deben considerar otras variables como la estacionalidad (Coral-Ruíz, 2015), el tipo de vegetación, la humedad, el clima, la cantidad (Peralta-Valencia et al., 2023), presencia de minerales, y nutrientes en el suelo (Delgado-Giler et al., 2022) que pueden explicar la composición observada.

Como conclusión, a pesar de que el MDS lleva un manejo más intensivo, aparentemente las comunidades de HMA por cada tratamiento no se ven afectadas considerando las variables tomadas. En contraste, las comunidades de HMA en el MMOBI parecen estar fuertemente afectadas negativamente, esto puede deberse a que el MMOBI es menos controlado y regulado en cuanto al corte de madera. El MDS se enfoca en la regeneración de bosques jóvenes y hacer aclareos. Cabe mencionar que, en este caso, como primer acercamiento para la descripción de comunidades, el pH y la MO, no fueron variables determinantes para evaluar las condiciones de las comunidades de HMA en dichos bosques de manera acertada, ya que dependieron de diferentes factores que no se consideraron en el análisis. Lo anterior sería una limitante para la descripción general de las comunidades de HMA en esta investigación, sin embargo, se da a conocer un acercamiento de algunos géneros que están presentes en las comunidades de estos bosques bajo actividades silvícolas intensivas.

Recomendaciones

Se deben considerar más variables ambientales abióticas y bióticas que afectan la abundancia y riqueza de esporas para los bosques templados de la región Chignahuapan-Zacatlán. En adición, también se deben actualizar los datos de corta de rodales de cada tratamiento y método silvícola para dar una descripción más acertada del estado en el que se encuentran las comunidades de HMA en los manejos silvícolas.

Finalmente, otra de las recomendaciones sería llevar a cabo una identificación hasta el nivel de especies de las esporas para dar un análisis más detallado respecto a la composición de especies de las comunidades de HMA de la región Chignahuapan-Zacatlán.

Referencias

Arancibia, R., Flores, M.E., Cabrera, T., Sanchez Beiza, J. & Obando, J. (2022). Evaluación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la rehabilitación ecológica de ecosistemas con actividad minera. *Ecosistemas*, 31(2): 2304.

Barrón Sevilla, J. A. (2021). Biodiversidad y manejo forestal en la Sierra Norte de Puebla. *Elementos* 123: 45-49.

Bentivenga, P. & Morton, J. (1995) A monograph of the genus *Gigaspora*, incorporating developmental patterns of morphological characters, *Mycologia*, 87:5.

Cruz, B. A. A. B. (2016). Diversidad de hongos micorrizógenos arbusculares asociados a helechos de un bosque tropical caducifolio de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, Querétaro, México. [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Coral-Ruiz, L. (2015). Estudio de la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares nativos y su potencial micorrízico en el cultivo de café (*Coffea arabica*) en diferentes condiciones agroecológicas de la región San Martín. [Tesis]. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.

Davison, J., Moora, M., Semchenko, M., Adenan, S. B., Ahmed, T., Akhmetzhanova, A. A. & Anslan, S. (2021). Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 231(2), 763–776.

Delgado-Giler, W. M., Vivas-Arturo, W. F., Solórzano-Zambrano, L. J., & Bonilla-Loor, M. J. (2022). Aislamiento y caracterización morfológica de comunidades de

hongos micorrízicos arbusculares en dos sistemas de pastoreo. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación, CIDEPRO*, 6(46):12-22.

Gómez, L. I. A., Portugal, V. O., Arriaga, M. R. & Alonso, R. C. (2007). Micorrizas arbusculares. *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3): 300-306.

Herrera-Peraza, R. A., Torres-Arias, Y. & Furrázola, E. (2016). Estructura de las comunidades de hongos micorrizógenos arbusculares en algunos ecosistemas naturales o afectados por la minería en Moa, Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 215(2).

Hernández, E. (2007). Micorriza vesículo arbuscular: presencia y colonización en hortalizas bajo un sistema orgánico, proyecto de servicio social, CBS, Departamento de Producción Agrícola y Animal, Licenciatura en Agronomía, Laboratorio de Fitopatología, Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco, D. F., México.

Hernández-Díaz, J. C., Corral-Rivas, J. J., Quiñones-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J. R. & Vargas-Larreta, B. (2008). Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques*, 14(3), 25-41.

Jiménez-Valle, K. (2017). Análisis de los fundamentos de dos sistemas silvícolas y sus efectos sobre la complejidad estructural en bosques templados del centro de México. [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México. p.54.

Loor, M. J. B. & Zambrano, L. J. S. (2019). Evaluación de la infectividad de comunidades de hongos micorrízicos arbusculares. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 3(21): 1-5.

Martínez, L. B. & Pugnaire, F. I. (2009). Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. Algunos ejemplos en los ecosistemas semiáridos. *Ecosistemas*, 18(2): 44-50.

Núñez-Ramos, P. A. (2021). Selección de esporas de micorrizas autóctonas en suelos procedentes de fincas ganaderas de República Dominicana: selección de esporas de micorrizas. *APF Revista Agropecuaria y Forestal*, 9(2): 43-56.

O'Hara, R.B. (2005). Species richness estimators: how many species can dance on the head of a pin? *J. Anim. Ecology*. 74, 375-386
Pérez C, A., Rojas S, J. & Montes V, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 3(2):366–385.

Pérez, S. G. C. (2020). Impacto territorial del manejo forestal comunitario en la Sierra Norte de Puebla, 2002-2017. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 17(): 1-17.

Peralta-Valencia, A. L., Castillo-Argüero, S., Hernández-Cuevas, L. V. & Vázquez-Santos, Y. (2023). Variación temporal en la composición de hongos micorrizógenos arbusculares en un bosque templado. *Ecosistemas*, 32(3).

Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B. & Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), 515–531.

Sánchez-Vaughan, A. (2021). Diagnóstico para la implementación de sistemas y métodos de manejo forestal en bosques regulares e irregulares. CONAFOR. México.

Salmerón-Santiago, I. A., Pedraza-Santos, M. E., Mendoza-Oviedo, L. S. & Chávez-Bárceñas, A. T. (2015). Cronología de la taxonomía y cladística de los glomeromicetos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 153-163.

Sieverding, E. (1983). Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular en el laboratorio. GTZ. Alemania, Pp. 37-40.

Sieverding, E. (1991). Vesicular – Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems. GTZ. Alemania. Pp.17-296.

Torres R., J. M. 1999. Sostenibilidad del volumen de cosecha calculado con el Método de Ordenación de Montes. Doc. de trabajo núm. 149. CIDE. 23 p.

Uibopuu, A., Moora, M., Saks, Ü., Daniell, T., Zobel, M. & Öpik, M. (2009). Differential effect of arbuscular mycorrhizal fungal communities from ecosystems along management gradient on the growth of forest understorey plant species. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(10), 2141–2146.

Varela, L., Estrada A., Álvarez-Sánchez, J. & Sánchez-Gallén, I. (2008). Catálogo ilustrado de hongos micorrizógenos arbusculares de la Reserva de la Biósfera de Los Tuxtlas. Facultad de Ciencias, UNAM, CDMX, México.

Vela-Correa, G., Rodríguez-Gamiño, M. L. & López-Blanco, J. (2010). Descripción de Perfiles de Suelos (Manual de Trabajo en Campo). Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Coyoacán, México. Pp. 95-101.

Wang, G. M., Stribley, D. P., Tinker, P. B. & Walker, C. (1993). Effects of pH on arbuscular mycorrhiza I. Field observations on the long-term liming experiments at Rothamsted and Woburn. *New Phytologist*, 124(3), 465–472.

Walker, C., Cuenca, G. & Sánchez, F. (1998). *Scutellospora spinosissima* sp. nov., A newly described Glomalean fungus from acidic, low nutrient plant communities in Venezuela. *Annals of Botany*, 82(1), 721-725.

Wanjala, P. M., Odhiambo, K. O., Balozi, K. & Sang, F. K. A. (2016). Effect of Different levels of artificial mycorrhizal inoculation on growth of *Pinus patula* Schldl. & Cham. seedlings. In Proceeding of the 3rd International Interdisciplinary Conference (IIC3), Eldoret, Kenya (pp. 7-9).

Páginas web utilizadas para las identificaciones y la elaboración de mapas:

<http://www.amf-phylogeny.com/> Revisada 11 de septiembre del 2023

<http://www.zor.zut.edu.pl.html> / Revisada 14 de octubre del 2023

<https://invam.ku.edu> / Revisada 23 de octubre del 2023

<https://sites.google.com/view/cicg-furb-espanhol/home?authuser=0> / Revisada 23 de octubre del 2023

<https://www.idiv.de/en/about-idiv.html> / Revisada 4 de noviembre del 2023

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> revisada 12 de abril del 2024

Anexos

Anexo 1. Calibración de dos puntos para el potenciómetro Hanna HI2211 pH/ORP Meter para muestras neutras a ácidas.

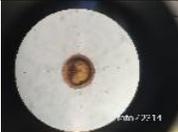
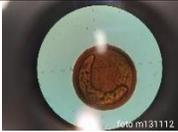
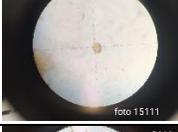
Materiales:

- Soluciones buffer de pH 4.01 y 7.01.
- 2 recipientes limpios preferentemente de cristal.
- Recipiente limpio con agua deionizada.

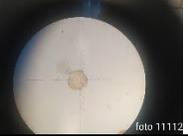
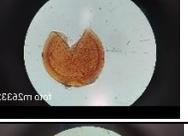
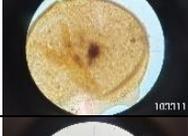
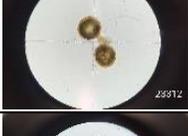
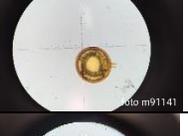
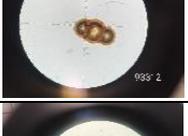
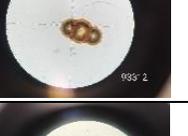
Procedimiento:

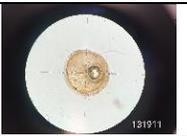
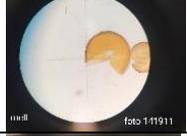
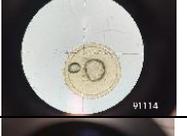
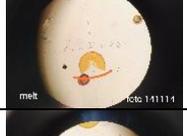
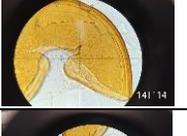
1. Primero se debe sumergir el electrodo con la sonda de temperatura en la solución buffer inicial, en este caso es la solución con un pH de 7.01.
2. Presionar el botón "CAL", y después aparecerá el icono de reloj de arena junto un LCD secundario con el buffer 7.01.
3. Esperar hasta que aparezca la leyenda "Ready", para posteriormente enjuagar el electrodo y la sonda de temperatura con agua deionizada.
4. Sumergir el electrodo y sonda en la solución buffer de pH 4.01 y pulsar el botón flecha hacia abajo hasta que aparezca en el LCD secundario el buffer de 4.01 junto con el icono reloj de arena.
5. Finalmente, esperar la leyenda "Ready" y presionar el botón "CFM".

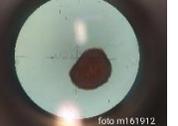
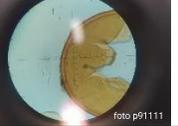
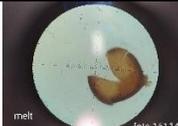
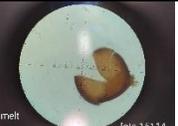
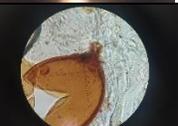
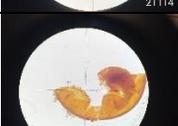
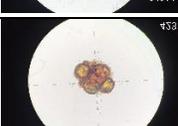
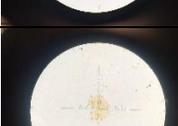
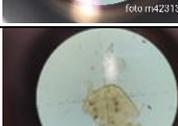
Anexo 2. Tabla de imágenes de los morfotipos identificados entre los dos manejos silvícolas (Método de desarrollo Silvícola y Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares), donde se presentan las fotos tomadas con el objetivo del microscopio a 40X, 100X con aceite de inmersión, fotos con solución Melzer, género e ID que vincula el morfotipo con la tabla 3 en resultados.

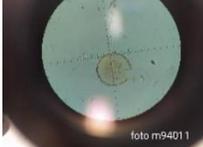
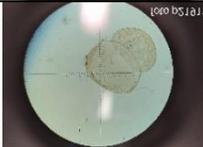
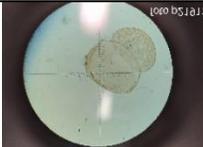
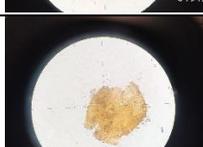
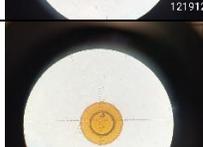
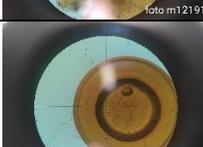
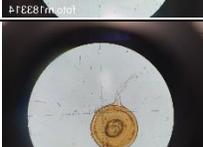
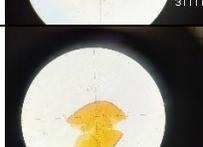
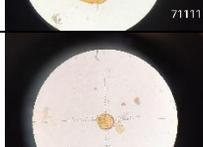
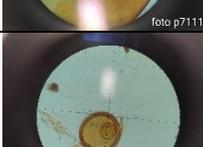
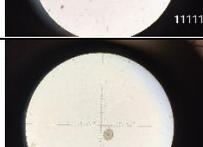
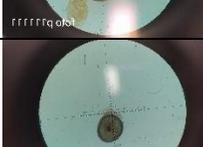
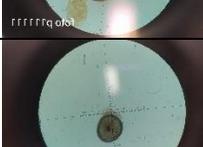
Fotos x40	Fotos x100	Fotos en Melzer	Género	ID
			<i>Acaulospora</i>	5111
			<i>S/I</i>	1111
			<i>Glomus</i>	3111
			<i>Acaulospora</i>	4111
			<i>Entrophospora</i>	6111
			<i>Pacispora</i>	7111
			<i>S/I</i>	8111
			<i>Sclerocystis</i>	9111

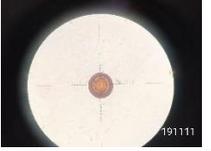
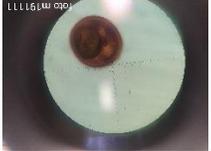
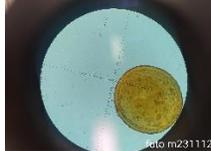
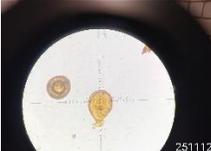
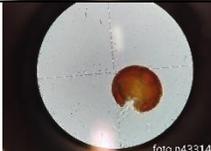
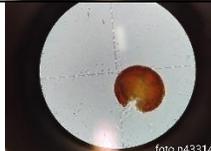
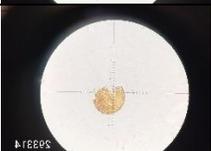
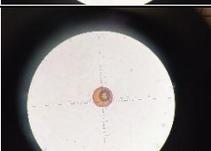
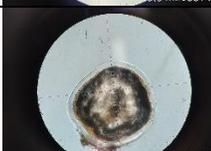
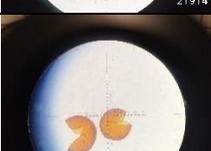
			<i>Diversispora</i>	11111
			<i>Glomus</i>	12111
			<i>Ambispora</i>	13111
			<i>S/I</i>	17111
			<i>Acaulospora</i>	18111
			<i>Diversispora</i>	20111
			<i>S/I</i>	22111
			<i>Rhizophagus</i>	25111
			<i>Glomus</i>	27111
			<i>S/I</i>	4112
			<i>Scutellospora</i>	7112
			<i>Glomus</i>	9112

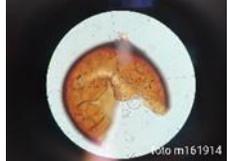
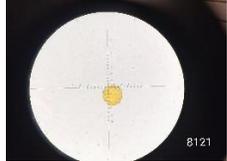
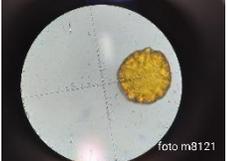
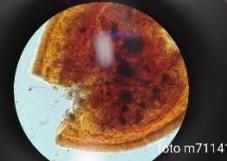
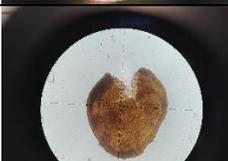
			<i>Glomus</i>	3114
			<i>Glomus</i>	10114
			<i>Glomus</i>	11114
			<i>Acaulospora</i>	15114
			<i>Glomus</i>	21114
			<i>Scutellospora</i>	9121
			<i>Acaulospora</i>	11121
			<i>Scutellospora</i>	1124
			<i>Glomus</i>	3124
			<i>Entrophospora</i>	5124
			<i>S/I</i>	22124
			<i>S/I</i>	27124

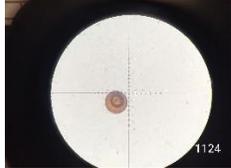
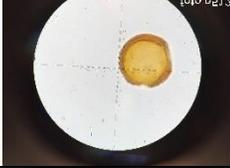
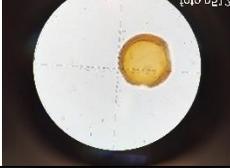
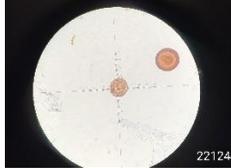
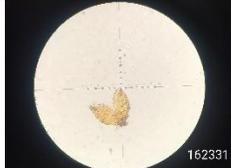
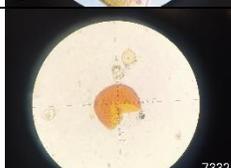
			<i>Pacispora</i>	2141
			<i>S/I</i>	11141
			<i>Scutellospora</i>	71114
			<i>S/I</i>	91114
			<i>Entrophospora</i>	141114
			<i>Glomus</i>	151114
			<i>Glomus</i>	161114
			<i>Acaulospora</i>	21113
			<i>Gigaspora</i>	31113
			<i>Glomus</i>	91113
			<i>Gigaspora</i>	31111
			<i>Entrophospora</i>	71111

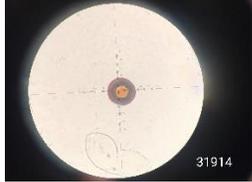
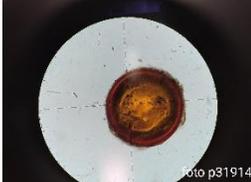
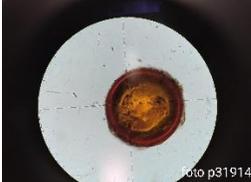
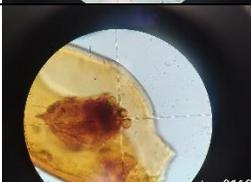
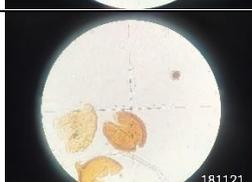
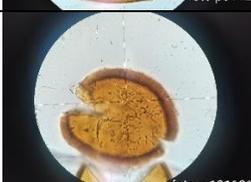
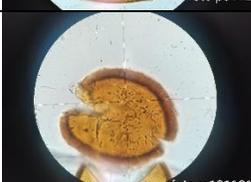
			<i>S/I</i>	111111
			<i>Acaulospora</i>	131111
			<i>Scutellospora</i>	161111
			<i>Glomus</i>	191111
			<i>Gigaspora</i>	61112
			<i>Scutellospora</i>	71112
			<i>Glomus</i>	181112
			<i>S/I</i>	231112
			<i>S/I</i>	251112
			<i>S/I</i>	81121
			<i>S/I</i>	181121
			<i>Dentiscutata</i>	101131

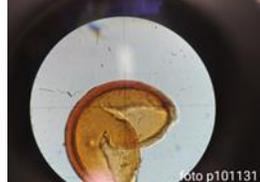
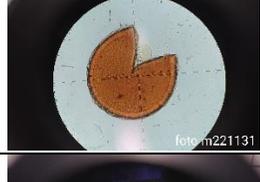
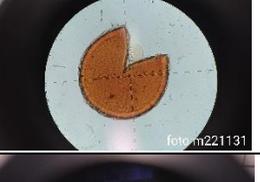
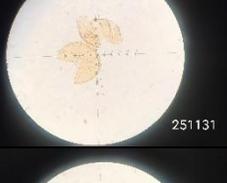
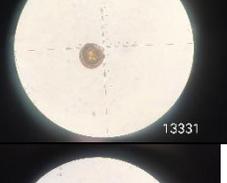
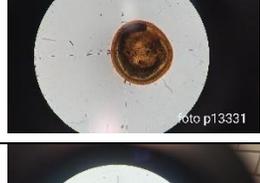
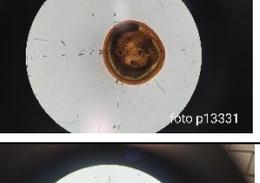
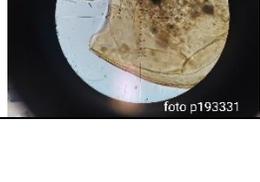
			<i>S/I</i>	111131
			<i>Glomus</i>	181131
		No disponible	<i>Acaulospora</i>	221131
			<i>Entrophospora</i>	251131
			<i>Acaulospora</i>	21141
			<i>S/I</i>	131141
			<i>Glomus</i>	141141
			<i>S/I</i>	41913
			<i>S/I</i>	81913
			<i>Glomus</i>	11911

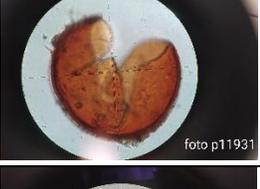
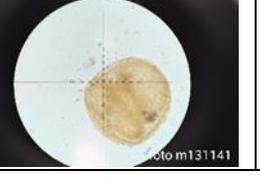
			<i>S/I</i>	21911
			<i>S/I</i>	41911
			<i>Gigaspora</i>	61911
			<i>S/I</i>	71911
			<i>S/I</i>	131911
			<i>Diversispora</i>	141911
			<i>S/I</i>	21912
			<i>Acaulospora</i>	31912
		No disponible	<i>S/I</i>	121912
			<i>Rhizophagus</i>	51914

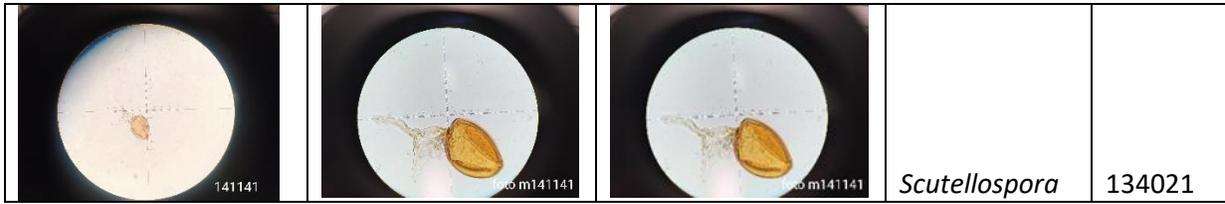
			<i>S/I</i>	111914
			<i>S/I</i>	161914
			<i>Acaulospora</i>	31914
			<i>S/I</i>	31921
			<i>Glomus</i>	51921
			<i>Acaulospora</i>	11931
			<i>Sclerocystis</i>	42314
			<i>Scutellospora</i>	42313
			<i>S/I</i>	102321
			<i>S/I</i>	132321

			<i>S/I</i>	182321
			<i>S/I</i>	142331
			<i>Glomus</i>	162331
			<i>Glomus</i>	23311
			<i>Glomus</i>	43311
			<i>Acaulospora</i>	83311
			<i>Glomus</i>	103311
		No disponible	<i>S/I</i>	23312
			<i>Sclerocystis</i>	63312

 233321	 foto m233321	 foto m233321	<i>Sclerocystis</i>	73312
 303321	 foto m303321	 foto m303321	<i>S/I</i>	93312
 73341	 foto p73341	 foto p73341	<i>Glomus</i>	103312
 103341	 foto p103341	 foto p103341	<i>Acaulospora</i>	43314
 31914	 foto p31914	 foto p31914	<i>Acaulospora</i>	293314
 1214	 foto p2141	No disponible	<i>Funneliformis</i>	73313
 11141	 foto m11141	 foto m11141	<i>S/I</i>	13321
 81121	 foto p81121	 foto p81121	<i>Glomus</i>	73321
 181121	 foto m181121	 foto m181121	<i>S/I</i>	143321

 101131	 foto p101131	 foto p101131	<i>Glomus</i>	233321
 111131	 foto p111131	 foto p111131	<i>Scutellospora</i>	303321
 181133	 foto p181131	 foto p181131	<i>S/I</i>	73341
 221131	 foto m221131	 foto m221131	<i>Glomus</i>	103341
 251131	 foto m251131	 foto m251131	<i>Sclerocystis</i>	13331
 13331	 foto p13331	 foto p13331	<i>Scutellospora</i>	73331
 73331	 foto p73331	 foto p73331	<i>Glomus</i>	193331
 193331	 foto p193331	 foto p193331	<i>Glomus</i>	223331

			<i>Rhizophagus</i>	233331
			<i>Gigaspora</i>	313331
			<i>Scutellospora</i>	34014
			<i>S/I</i>	14011
			<i>Acaulospora</i>	44011
			<i>S/I</i>	94011
			<i>Glomus</i>	154011
			<i>Diversispora</i>	124021



Buen Visto de los Asesores.



Dr. Facundo Rivera Becerril
No. Eco. 18775
Asesor Interno
UAM-Xochimilco



Dra. Irene Sánchez Gallén
No. Eco. 118548
Asesor Externo
Facultad de Ciencias, UNAM