



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE CIENCIAS

**La comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en  
un gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa* de la  
cuenca del río Magdalena, Ciudad de México, México**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**  
**B I Ó L O G A**  
**P R E S E N T A:**  
**PERALTA VALENCIA ARIADNA LIZETH**

**DIRECTORA DE TESIS**  
**M. en C. VÁZQUEZ SANTOS YASMIN**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

### **1. Datos del alumno**

<b>Apellido paterno</b>	Peralta
<b>Apellido materno</b>	Valencia
<b>Nombre (s)</b>	Ariadna
<b>Teléfono</b>	Lizeth
<b>Universidad Nacional Autónoma de México</b>	
<b>Facultad de Ciencias</b>	
<b>Carrera</b>	Biología
<b>Número de Cuenta</b>	314320469

### **2. Datos del tutor**

<b>Grado</b>	Maestra en Ciencias
<b>Nombre (s)</b>	Yasmin
<b>Apellido paterno</b>	Vázquez
<b>Apellido materno</b>	Santos

### **3. Datos del Sinodal 1**

<b>Grado</b>	Doctora
<b>Nombre (s)</b>	Silvia Margarita
<b>Apellido paterno</b>	Carrillo
<b>Apellido materno</b>	Saucedo

### **4. Datos del sinodal 2**

<b>Grado</b>	Doctora
<b>Nombre (s)</b>	Laura Verónica
<b>Apellido paterno</b>	Hernández
<b>Apellido materno</b>	Cuevas

### **5. Datos del sinodal 3**

<b>Grado</b>	Maestro en Biología
<b>Nombre (s)</b>	Eduardo
<b>Apellido paterno</b>	Chimal
<b>Apellido materno</b>	Sánchez

### **6. Datos del sinodal 4**

<b>Grado</b>	Doctora
<b>Nombre (s)</b>	Rosalva

**Apellido paterno**

García

**Apellido materno**

Sánchez

**7. Datos del trabajo escrito**

**Título**

La comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en un gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, Ciudad de México, México.

**Número de páginas**

51

**Año**

2024

## **Agradecimientos académicos**

A la M. en C. Yasmin Vázquez Santos por enseñarme sobre los fascinantes hongos micorrizógenos, desde la teoría hasta el procesamiento de las muestras de esporas. Así como su guía y apoyo para encaminar este trabajo a su culminación.

A la Dra. Silvia Castillo Argüero por su apoyo durante la realización del trabajo, sus revisiones y comentarios que enriquecieron no solo este trabajo, sino mi formación académica.

A la Dra. Leticia Bonilla Valencia por su orientación para los análisis estadísticos, sus revisiones y sugerencias.

A la Dra. Irene Sánchez Gallen por el préstamo del equipo para realizar la extracción de las muestras.

A la Dra. Silvia Margarita Carrillo Saucedo por su apoyo en la revisión, comentarios y sugerencias para mejorar.

Al M. en B. Eduardo Chimal Sánchez por sus comentarios que enriquecieron este trabajo, su tiempo y revisiones.

A la Dra. Rosalva García Sánchez por sus revisiones y sugerencias.

A la Dra. Laura Verónica Hernández Cuevas quien con su experiencia enriqueció este trabajo, le agradezco su apoyo para la identificación taxonómica y el brindarme su tiempo para conocer más sobre los hongos micorrizógenos.

Al proyecto DGAPA- PAPIIT- IN211118 “Efectos de los disturbios antrópicos en la diversidad funcional de un bosque templado dentro de la Ciudad de México” por financiar este proyecto.

## **Agradecimientos personales**

A mis padres Lydia Valencia García y Juan José Peralta Contreras por apoyarme durante mi formación académica y darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, su cariño está siempre conmigo, gracias por su amor y paciencia.

A mis hermanos Lydia Viridiana y Fernando Enrique por motivarme y darme ánimos para avanzar, así como por alegrarse por mis logros y acompañarme en mis penas, los quiero mucho.

A mis abuelos Aurora García Velázquez y Félix Valencia, espero que se sientan muy orgullosos de mí, un abrazo hasta el cielo.

A mi asesora Yasmín Vázquez Santos, por motivarme a culminar este trabajo, tus consejos académicos y personales me han hecho una mejor persona. Te agradezco por el apoyo incondicional que me brindaste, y la paciencia que pusiste en mí para que lograra culminar. Eres una persona que admiro demasiado, gracias por todo.

A la Dra. Silvia por brindarme un espacio en el laboratorio, por creer en mí y apoyarme cuando lo necesité. Agradezco mucho el conocer a una persona como usted, siempre me trató como familia y me hizo un espacio en su corazón como yo en el mío.

A mis amigos Brenda, Alejandra y Samuel por compartir aventuras durante la carrera, estoy muy feliz de poder compartir la pasión por la biología con ustedes.

A Emmanuel por adentrarme en el mundo de la ciencia, te agradezco mucho haberme acompañado siempre, por todo el apoyo y el cariño, te deseo lo mejor.

A mis profesores y compañeros de taller Yuriana, Leticia, Gustavo, Joaquín y Tania por brindarme su amistad, sus comentarios, y apoyo para lograr terminar este trabajo.

A mi familia que siempre se mantuvo al pendiente de mí y se alegró por ver mis objetivos cumplidos.

A Teodora Avilés y Dionei Luna por apoyarme y brindarme ánimos siempre. Agradezco mucho que me apoyarán y que impactarán positivamente en mí.

A Alejandro quien me dio el empujón que necesitaba para seguir adelante, te quiero demasiado, gracias por creer en mí.

## **Lista de cuadros**

**Cuadro 1.** Valores promedio  $\pm$  error estándar de las propiedades químicas del suelo del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena durante la temporada de lluvias y de secas. Datos pertenecientes a muestras recolectadas en el periodo 2012-2017.

**Cuadro 2.** Datos geográficos de los tres sitios de muestreo ubicados dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

**Cuadro 3.** Valores promedio  $\pm$  error estándar de las variables abióticas y edáficas de los tres sitios de muestreo del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

**Cuadro 4.** Listado de especies de hongos micorrizógenos arbusculares encontrados en los tres sitios muestreados en ambas temporadas en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, Cd. Mex., México.

**Cuadro 5.** Valores de los coeficientes del índice de Jaccard.

**Cuadro 6.** Listado de especies de plantas encontrados durante la temporada de lluvias y de secas en el bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del río Magdalena.

**Cuadro 7.** Listado de plantas anuales registradas en los sitios de muestreo dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

## Lista de figuras

**Figura 1.** Ubicación geográfica de la zona de estudio y de las parcelas muestreadas dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

**Figura 2.** Montaje de esporas en portaobjetos.

**Figura 3.** Características morfológicas de importancia taxonómica esporas de HMA.

**Figura 4.** Fotografías de algunas de las especies de HMA observadas en suelo del bosque de *Abies religiosa* de la CRM. Dónde: A) *Acaulospora alpina*, B) *A. colombiana*, C) *A. delicata*, D) *A. laevis*, E) *A. mellea*, F) *A. aff. spinosissima*, G) *Acaulospora* sp. 2, H) *Ambispora gerdemannii*, I) *Funneliformis mosseae*, J) *Glomus* sp. 1, K) *Rhizophagus clarus*, L) *Rhizophagus fasciculatus*.

**Figura 5.** Diagrama de Venn que muestra el número de especies de HMA compartidas entre los sitios.

**Figura 6.** Análisis de escalamiento multidimensional no métrico NMDS que ordena a las especies de HMA dentro de los tres sitios del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena. Los valores presentados corresponden a los porcentajes del índice de Jaccard.

**Figura 7.** Clúster de dos vías utilizando la presencia-ausencia de las especies de HMA encontradas en cada sitio para ambas temporadas a un corte del 50 % de similitud. Color rosa= grupo 1, Verde= grupo 2, Azul= grupo 3, Color naranja= grupo 4, Morado= grupo 5, Rojo= grupo 6. La clave de las filas está compuesta por el número de sitio (S1-S3), seguido del número de la parcela (p1-p15), seguido de la temporada (S-L).

**Figura 7.** Análisis de escalamiento multidimensional no métrico NMDS de los tres sitios del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena y las especies de HMA que integran. Utilizando el índice de Jaccard.

**Figura 8.** Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA). Color rosa= grupo 1, Verde= grupo 2, Azul= grupo 3, Color naranja= grupo 4, Morado= grupo 5, Rojo= grupo 6. Dentro de los recuadros de color se indica a las especies exclusivas de cada grupo.

**Figura 9.** Análisis de correspondencia canónica (CCA). Los grupos de HMA se ilustran en triángulos con sus colores correspondientes. Rojo= grupo 1, Verde= grupo 2, Color turquesa= grupo 3, Color rosa= grupo 4, Azul = grupo 5, Color naranja= grupo 6. Donde T= temperatura, L= luz, Dosel= apertura del dosel, Pend= pendiente, MO %= porcentaje de materia orgánica, HRS %= porcentaje de humedad relativa, Nt= nitrógeno total, P= fósforo



# Índice

<i>Resumen</i> .....	1
<b>1. Introducción y antecedentes</b> .....	2
<b>1.1 Los bosques templados y los hongos micorrizógenos arbusculares</b> .....	2
<b>1.1.1 Hongos micorrizógenos arbusculares reportados en bosques templados</b> .....	3
<b>1.2 Factores bióticos que afectan a la comunidad de HMA</b> .....	4
<b>1.2.1 Estructura de la comunidad planta- HMA</b> .....	4
<b>1.2.2 Hipótesis sobre la interacción planta-HMA</b> .....	5
<b>1.3 Factores abióticos que afectan la comunidad de HMA</b> .....	6
<b>2. Justificación</b> .....	10
<b>3. Objetivos</b> .....	11
<b>3.1. Objetivo general</b> .....	11
<b>3.2. Objetivos particulares</b> .....	11
<b>4. Hipótesis</b> .....	11
<b>5. Materiales y métodos</b> .....	12
<b>5.1. Zona de estudio: Bosque de <i>Abies religiosa</i></b> .....	12
<b>5.2. Variables abióticas</b> .....	14
<b>5.2.1 Recolecta de muestras biológicas</b> .....	16
<b>5.2.2 Caracterización de la comunidad vegetal</b> .....	16
<b>5.3 Trabajo de laboratorio</b> .....	16
<b>5.3.1 Cultivos trampa</b> .....	16
<b>5.3.2 Extracción de esporas (método de Brundrett <i>et al.</i>, 1996)</b> .....	17
<b>5.3.3 Montaje de esporas en preparaciones fijas (Koske y Tessier 1983; Brundrett <i>et al.</i>, 1966)</b> .....	17
<b>5.3.4 Caracterización morfológica de las esporas de los HMA</b> .....	18
<b>6. Análisis estadísticos</b> .....	19
<b>7. Resultados</b> .....	20
<b>7.1. Composición y riqueza de HMA</b> .....	20
<b>7.2. Especies compartidas</b> .....	24
<b>7.3 La altitud y los HMA</b> .....	25
<b>7.4 Composición y riqueza florística</b> .....	29
<b>7.5 Relación planta-hongo-ambiente</b> .....	30
<b>8. Discusión</b> .....	33

<i>9. Conclusiones.....</i>	<i>37</i>
<i>11. Referencias.....</i>	<i>38</i>
<i>11. Anexo.....</i>	<i>51</i>

## Resumen

En distintos ecosistemas, la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) es condicionada por la composición de plantas y las variaciones en los factores abióticos; dentro de los bosques templados factores como el gradiente altitudinal, la temperatura, la precipitación, la cantidad de luz y las propiedades fisicoquímicas del suelo condicionan la presencia de los HMA. El objetivo de este trabajo fue evaluar la relación que existe entre la composición de hongos micorrizógenos arbusculares y la composición florística en un gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del río Magdalena, Ciudad de México, México, y analizar la influencia de algunas variables abióticas. Se seleccionaron tres sitios con diferente altitud. En cada sitio se establecieron cinco parcelas de 100 m<sup>2</sup>. Se recolectó suelo de cada parcela en temporada seca y de lluvias. Se montaron cultivos trampa con semillas de *Sorghum* spp. Se realizó la extracción de esporas a través del método de Brundrett *et al.* (1996), y el montaje de éstas en preparaciones fijas se hizo mediante el método de Koske y Tessier (1983). La identificación se realizó mediante el uso de algunas claves taxonómicas y comparaciones, de las características morfológicas de las esporas, con las descripciones especializadas en Glomeromycota, disponibles en diversas publicaciones y en la International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM 2022). Los resultados mostraron la presencia de 24 especies de HMA. Durante la temporada de secas se registraron 14 especies y durante la temporada de lluvias 20; *Acaulospora rehmii*, *Ambispora appendicula*, *Acaulospora* aff. *ignota* y *Acaulospora* aff. *spinossisima* se presentaron únicamente en la temporada seca; mientras que *Acaulospora delicata*, *Acaulospora spinosa*, *Claroideoglobus claroideum*, *Funneliformis mosseae*, *Glomus glomerulatum*, *Acaulospora* aff. *tortuosa*, *Acaulospora* sp. 2 y *Glomus* sp. 1 fueron exclusivas de la temporada de lluvias. *Acaulospora* fue el género el más frecuente. La comunidad florística estuvo representada por 16 especies durante la temporada de lluvias y 20 especies durante la temporada de secas. En ambas temporadas el sitio 2 presentó un mayor número de especies. De acuerdo con el análisis de correspondencia canónica (CCA) no hubo una relación entre la composición de especies de HMA y la diversidad florística. Sin embargo, se encontró una relación de la composición de las plantas con las variables ambientales y edáficas, en donde algunas especies de plantas hospedantes se distribuían en los diferentes cuadrantes exhibiendo una preferencia por condiciones abióticas particulares.

## 1. Introducción y antecedentes

### 1.1 Los bosques templados y los hongos micorrizógenos arbusculares

Los bosques templados se distribuyen en altitudes que van de los 2 000 a los 3 400 m s.n.m., presentan un clima templado húmedo con una estacionalidad anual marcada, siendo cálidos durante el verano, fríos durante el invierno y con lluvias a lo largo del año (Sánchez *et al.*, 2003). En México, estos ecosistemas constituyen alrededor del 16 % de la cobertura forestal del país y son los segundos en importancia por su amplia distribución (Galicia *et al.*, 2018). Estos bosques se encuentran estrechamente relacionados con las zonas montañosas, en donde se puede apreciar el efecto de la altitud con el clima, lo que se refleja en una alta heterogeneidad espacial y ambiental. Se sabe que los bosques, como los templados, proveen distintos servicios ecosistémicos, entre los que se encuentran la producción de oxígeno, la captación de agua de lluvia, el almacenamiento de carbono, la estabilidad del suelo, la obtención de productos maderables y no maderables, el adecuado desarrollo de los ciclos biogeoquímicos y la regulación del clima (Rzedowski, 2006; Monson, 2014; CONABIO, 2019). No obstante, debido al aprovechamiento excesivo de sus recursos y a la incidencia de la actividad antrópica, se han modificado diversos procesos ecológicos de estos ecosistemas, que han ocasionado cambios en la composición florística y en la sucesión vegetal, además de acelerar la erosión y degradación del suelo (Galicia *et al.*, 2007; SEMARNAT, 2018).

Entre los organismos edáficos más importantes para el mantenimiento de la estructura, estabilidad y calidad de los suelos en los bosques templados está el grupo de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) (Rillig, 2004; Powell y Rilling, 2018), los cuales son un componente esencial del edafón; representan entre el 20 - 30 % de la biomasa total de la microbiota edáfica (Olsson *et al.*, 1999; Rillig, 2004; Powell y Rilling, 2018). Los HMA pertenecen al phylum Glomeromycota; se caracterizan por formar arbusculos, que son ramificaciones de las hifas donde se lleva a cabo el intercambio de nutrientes hongo – planta y viceversa, presentan hifas no septadas ya sea intra o extra-radicalmente (Redecker *et al.*, 2013; Spatafora *et al.*, 2016); se estima que son simbioses obligados del 80 % de las plantas terrestres (Smith y Read, 2008). Estos hongos colonizan las raíces de su planta hospedante por medio de esporas maduras u otras fuentes de propágulos como micelio extra-radical y/o raíces colonizadas; forman una simbiosis mutualista denominada micorriza arbuscular (Smith y Read, 2008). La formación de esta asociación tiene efectos positivos para ambos interactuantes, por un lado, los HMA aumentan el transporte de macro y micronutrientes limitantes hacia las raíces y la absorción de agua, brindan una mayor tolerancia a patógenos y a temperaturas altas (Fisher

*et al.*, 1992). Por otro lado, las plantas transfieren entre el 20 % y 50 % de fotosintatos, que se destinan al mantenimiento de la actividad y función de los HMA en las raíces y son el hábitat donde los HMA pueden desarrollarse, sobrevivir y completar su ciclo de vida (Mosse y Phillips, 1971; Jakobsen y Rosendahl, 1990). En la asociación micorrícica arbuscular debe existir un equilibrio en el flujo de nutrientes entre ambos interactuantes, ya que los HMA pueden comportarse como parásitos cuando los costos de la simbiosis para la planta exceden los beneficios, haciendo que esta asociación transcurra a través de un continuo mutualismo-parasitismo (Linderman, 2000).

Estos hongos producen una glicoproteína llamada glomalina que protege a las hifas durante el transporte de nutrientes, actuando como cementante al quedar las partículas del suelo atrapadas por las redes hifales, favoreciendo la formación de agregados del suelo. Estos microorganismos tienen una gran importancia ecológica, debido a que intervienen en el proceso de regeneración natural al participar en el desarrollo, establecimiento, supervivencia y reproducción de las especies del sotobosque (Olivera-Morales *et al.*, 2011; Varela-Fregoso *et al.*, 2017), actualmente, se ha reconocido su contribución a la descomposición de la materia orgánica al regular a las poblaciones microbianas del suelo (Gui *et al.*, 2017).

### 1.1.1 Hongos micorrizógenos arbusculares reportados en bosques templados

El conocimiento sobre la comunidad de HMA en bosques templados ha tomado mayor interés gracias a la importancia ecológica de estos ecosistemas. De acuerdo con Polo Marcial *et al.*, (2021) en los bosques templados de México se han registrado 39 especies de HMA que pertenecen principalmente a Acaulosporaceae y Glomeraceae. Algunas especies reportadas para los bosques templados son: *Acaulospora delicata* C. Walker, C.M. Pfeiff. & Bloss, *A. denticulata* Sieverd. & S. Toro, *A. foveata* Trappe & Janos, *A. laevis* Gerd. & Trappe, *A. mellea* Spain & N.C. Schenck, *A. morrowiae* Spain & N.C. Schenck, *A. scrobiculata* Trappe, *A. spinosa* C. Walker & Trappe, *A. splendida* Sieverd., Chaverri & I. Rojas, *A. rehmi* Sieverd. & S. Toro, *Ambispora fennica* C. Walker, Vestberg & A. Schüßler, *A. leptoticha* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker, Vestberg & A. Schüßler, *Cetraspora pellucida* (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) Oehl, F.A. Souza & Sieverd, *Diversispora spurca* (C.M. Pfeiff., C. Walker & Bloss) C. Walker & A. Schüßler, *Dentiscutata cerradensis* Sieverd., F.A. Souza & Oehl, *D. nigra* (J.F. Redhead) Sieverd., F.A. Souza & Oehl, *D. scutata* (C. Walker & Dieder.) Sieverd., F.A. Souza & Oehl, *Entrophospora infrequens* (I.R. Hall) R.N. Ames & R.W. Schneid, *Funneliformis geosporus* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler, *F. mosseae* (T.H. Nicolson &

Gerd.) C. Walker & A. Schüßler, *Fuscutata heterogama* Oehl, F.A. Souza, L.C. Maia & Sieverd, *Gigaspora albida* N.C. Schenck & G.S. Sm, *G. candida* Bhattacharjee, Mukerji, J.P. Tewari & Skoropad, *Pacispora scintillans* (S.L. Rose & Trappe) Sieverd. & Oehl ex C. Walker, Vestberg & A. Schüßler, *Racocetra fulgida* (Koske & C. Walker) Oehl, F.A. Souza & Sieverd, *R. gregaria* (N.C. Schenck & T.H. Nicolson) Oehl, F.A. Souza & Sieverd, *R. verrucosa* (Koske & C. Walker) Oehl, F.A. Souza & Sieverd, *Redeckera fulva* (Berk. & Broome) C. Walker & A. Schüßler, *Rhizophagus clarus* (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) Sieverd., G.A. Silva & Oehl, *R. microaggregatus* (Koske, Gemma & P.D. Olexia) Sieverd., G.A. Silva & Oehl, *Scutellospora calospora* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & F.E. Sanders y *S. dipurpurescens* J.B. Morton & Koske, *Sieverdingia tortuosa* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) Błaszcz., Niezgoda & B.T. Goto, *Septoglomus viscosum* (T.H. Nicolson) C. Walker, D. Redecker, Stille & A. Schüßler, y *S. constrictum* (Trappe) Sieverd., G.A. Silva & Oehl. Además, se ha reportado la presencia de tres especies exclusivas de este ecosistema, *Acaulospora alpina* Oehl, Sýkorová & Sieverd, *Diversispora epigaea* (B.A. Daniels & Trappe) C. Walker & A. Schüßler y *Glomus radiatum* (Thaxt.) Trappe & Gerd.

## **1.2 Factores bióticos que afectan a la comunidad de HMA**

### **1.2.1 Estructura de la comunidad planta- HMA**

Existe una relación bidireccional entre las plantas y los hongos micorrizógenos arbusculares; los HMA afectan la composición de la comunidad vegetal al promover el establecimiento de las plántulas a través de la transferencia de nutrientes como fósforo y nitrógeno, al tiempo que ayudan a resistir condiciones hídricas desfavorables (Gange *et al.*, 1993; Smith y Read, 2008). El aumento de la diversidad vegetal proporciona una variedad de nichos ecológicos que da como resultado hábitats de suelo más complejos que en sitios con baja diversidad vegetal; la micorriza arbuscular se asocia con la riqueza alta de especies en bosques y pastizales (Waldrop *et al.*, 2006; Gerz *et al.*, 2016). Sin embargo, el establecimiento de los HMA también se ve afectado por la compatibilidad entre simbioses (Silva *et al.*, 2008).

Por otra parte, los patrones de distribución espacial de las plantas pueden ocasionar variaciones en la riqueza de HMA que colonizan las raíces, tal y como lo comprobaron Bittebiere *et al.* (2020), quienes demostraron que la distribución espacial de plantas explica alrededor del 58 % y 70 % de las variaciones en la riqueza de hongos micorrícicos arbusculares en raíces de dos especies de pastos *Brachypodium pinnatum* (L.) P.Beauv., y *Elytrigia repens* Desv., Poaceae, respectivamente. Es importante considerar que no solo la distribución espacial,

sino también el ensamblaje de la comunidad vegetal genera variaciones en la comunidad de HMA. Hausmann y Hawkes (2010) manipularon el orden de establecimiento de especies de plantas de forma experimental y demostraron que las primeras especies vegetales establecidas determinaban el grupo de hongos micorrizógenos arbusculares inicial, lo que influyó en los conjuntos de HMA de las especies de plantas establecidas posteriormente. La edad de las plantas también puede limitar la presencia de ciertas especies de HMA; en el estudio de Husband *et al.* (2002) realizado en un bosque tropical de Panamá, observaron que la diversidad de HMA disminuyó con la edad de las plantas, ellos reportaron que las de mayor edad (cinco años) estaban dominadas por un solo tipo de hongo, mientras que las plántulas emergentes poseían una mayor diversidad. Esto indica que, la asociación planta-hongo tiene influencia en la composición de especies de la comunidad vegetal y la diversidad de hongos (Van der Heijden *et al.*, 1998; Lekberg y Koide, 2005).

### **1.2.2 Hipótesis sobre la interacción planta-HMA**

La transformación de un ecosistema puede llevar a la comunidad vegetal a otro estado sucesional diferente del que le corresponde y con ello, afectar su interacción con los HMA. Se han planteado hipótesis en torno a los factores que modifican la interacción planta-HMA, entre las que destacan las hipótesis del conductor y del pasajero propuestas por Hart *et al.* (2001). La hipótesis del conductor señala que, las interacciones dentro de las comunidades de HMA son responsables de los cambios en las comunidades vegetales al modificar el rendimiento de las plantas, mientras que en la hipótesis del pasajero se indica que la dinámica de la comunidad de HMA es un subproducto de los cambios en las comunidades vegetales, originado por asignaciones diferenciales de carbono a ciertos taxa de HMA. En el mismo sentido, Zobel y Opik (2014) propusieron la hipótesis del hábitat, que explica que, los cambios en las comunidades de plantas y de hongos están dados por las condiciones abióticas (Vieira *et al.*, 2019). A escala local, se ha propuesto que factores como el gradiente altitudinal, la temperatura, la precipitación, la cantidad de luz y las propiedades fisicoquímicas del suelo determinan de diferente manera la composición y estructura de la comunidad de plantas y de HMA presentes en los bosques templados (Davison *et al.*, 2015).

Estas hipótesis sobre la interacción planta-HMA ofrecen una base teórica sólida para comprender la relación entre la composición de plantas y las especies de HMA observadas en este estudio. Ayudarán a explicar cómo los cambios a través del gradiente altitudinal en las

comunidades vegetales y los factores ambientales pueden asociarse a la diversidad y composición de los HMA en los bosques templados.

### **1.3 Factores abióticos que afectan la comunidad de HMA**

La comunidad de HMA en diferentes ecosistemas, como los bosques templados, es influenciada por el relieve y la topografía heterogénea (Lugo et al. 2007), que son resultado de la compleja dinámica geomorfológica que tienen estos bosques, las propiedades edáficas derivadas de la variación en los procesos pedogenéticos, de erosión y deposición, y la estacionalidad marcada por los cambios en las condiciones climáticas (Ovalles y Collins, 1986; Sánchez *et al.*, 2003).

En la vegetación de montaña, la altitud es uno de los principales factores que modela la estructura de las comunidades fúngicas, ya que a lo largo del gradiente altitudinal condiciones ambientales como la temperatura, la radiación solar y la precipitación varían generando microambientes que producen diferencias en las condiciones edáficas y en la composición vegetal (Sánchez *et al.*, 2003).

La mayoría de los estudios reportan una menor riqueza de HMA a medida que la altitud incrementa, lo que concuerda con el estudio de Lugo *et al.* (2007) realizado en el pastizal de la Puna que va del noroeste de Argentina al sur de Perú. A lo largo de un gradiente altitudinal, encontraron que la riqueza de esporas de HMA disminuyó, con los valores más bajos a 3 700 y 3 870 m s.n.m, esto coincide con el efecto estresante producido a una mayor altitud que ocasiona estrés hídrico en las plantas hospedantes, debido a una mayor incidencia lumínica. Observaron representantes de *Acaulosporaceae*, *Glomeraceae* y *Gigasporaceae* en altitudes bajas (3 520 m s.n.m), mientras que en altitudes altas (3 700 a 3 870 m s.n.m), solo encontraron esporas de *Glomeraceae*. Así mismo, Looby *et al.* (2016), quienes realizaron un estudio en la Reserva del Bosque Nuboso de Monteverde, Costa Rica, en un gradiente altitudinal que iba de los 1 350 m s.n.m a los 1 850 m s.n.m, registraron que a medida que aumentaba la altitud, disminuían la temperatura y el pH del suelo; en respuesta a estos cambios ambientales y edáficos la comunidad de HMA presentó una disminución de la riqueza taxonómica durante la temporada seca. Guo *et al.* (2020) reportaron el mismo patrón, menor diversidad para la comunidad de HMA a medida que aumentó la altitud en la montaña Taibai, provincia de Shaanxi, China. Con base en sus resultados sugirieron que la presencia de los HMA se vio afectada principalmente por la diversidad alfa de las plantas y la hojarasca; mientras que la comunidad de HMA fue débilmente influenciada por las propiedades del suelo. No obstante, es importante considerar que los factores edáficos, bajo otros contextos, también determinan los patrones de esporulación de los HMA. Por ejemplo, se ha reportado que la variación de las



comunidades de HMA depende del pH y del contenido de nutrientes del suelo (Dumbrell *et al.*, 2010; Lekberg *et al.*, 2011; Meadow y Zabinski, 2012). En el caso del pH del suelo, este afecta la germinación de las esporas y el crecimiento de las hifas de HMA (Gai *et al.*, 2004), e influye en la disponibilidad de nutrientes como el fósforo, el carbono y el nitrógeno al impactar en las tasas de descomposición y en la solubilidad de los compuestos como el fosfato. En el estudio de Dumbrell *et al.* (2010) demostraron que la variación de la comunidad de HMA se atribuyó a factores edafo-ambientales, especialmente el pH, la relación C/N y la disponibilidad de fósforo. Los cambios en el valor de pH que afectan la disponibilidad de nutrientes, como la concentración de formas disponibles del nitrógeno ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) y del fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) afectan significativamente el crecimiento de las plantas y la efectividad de la simbiosis micorrízica.

Si el pH es bajo será más difícil para las plantas movilizar el fósforo, lo que promoverá el establecimiento de una interacción con los HMA (Carrenho *et al.*, 2007). De acuerdo con los resultados de Van Geel *et al.* (2018), quienes evaluaron la influencia de factores abióticos del suelo en pastizales, el pH y el fósforo disponible estaban significativamente relacionados con la comunidad de HMA. Se sabe que en suelos con pH fuertemente ácido (pH=3) disminuye la disponibilidad del fósforo al formar complejos insolubles con los cationes de  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , lo que puede promover el desarrollo y el establecimiento de la simbiosis de HMA (Ramírez *et al.*, 2011; Carrino *et al.*, 2016). En el trabajo realizado por Ong *et al.* (2012), observaron una correlación negativa entre la baja disponibilidad de fósforo y el aumento en la esporulación de los HMA, de tal manera, que, si este nutriente se encuentra en concentraciones altas en el suelo, la simbiosis se reduce o incluso puede ser inhibida; en el caso de los suelos con propiedades Ándicas. Por ejemplo, en el bosque de *A. religiosa* de la cuenca del río Magdalena, la disponibilidad del P es limitada, porque las arcillas secuestran a los iones fosfato, lo que puede afectar el proceso de esporulación de algunas especies de HMA (Vázquez-Santos *et al.*, 2021).

Adicionalmente, se ha observado que en suelos con un pH ligeramente ácido se puede favorecer la esporulación de los HMA (Postma *et al.*, 2007). Vázquez-Santos (2016), observó un aumento en la abundancia total de esporas de HMA en valores de pH entre 5.8 y 6 comparado con suelos con un pH ácido menores a 5.5 (FAO, 2023). Algunas especies de HMA de las familias *Acaulosporaceae* y *Glomeraceae* se encuentran en suelos con bajos pH y contenido de fósforo (Moreira-Souza *et al.*, 2003). Existen estudios que reportan que la abundancia de HMA cambia a lo largo de los gradientes dados por el contenido de nitrógeno, a mayor contenido de este nutriente, disminuye la abundancia de HMA (Egerton-Warburton y Allen, 2000)

De manera complementaria, se han realizado experimentos *in vitro* para mostrar que especies de HMA pueden acceder a ciertos nutrientes orgánicos y proporcionarlos a su planta hospedante. Algunos ejemplos son *Rhizophagus intraradices*, que puede obtener fósforo orgánico y *Funneliformis mosseae* que obtiene nitrógeno orgánico bajo condiciones controladas donde se emplearon cultivos madre de micorrizas y placas Petri con medio de cultivo (Hawkins *et al.*, 2000; Koide y Kabir, 2000). Sin embargo, el resto de las especies de HMA experimentan aumento o disminución de la abundancia ante los cambios en el N y P del suelo. Egerton-Warburton *et al.* (2007), realizaron un estudio en pastizales perennes para evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la comunidad de HMA, encontraron que, en suelos ricos en fósforo, la fertilización con nitrógeno provocó una disminución en la diversidad de esporas, debido a la pérdida de especies raras, y un aumento de la abundancia de especies de *Glomus sensu lato*, mientras que en suelos con fósforo limitado se observó un aumento en la diversidad de HMA, lo cual sugiere que los cambios estequiométricos en la relación N/P puede influir en la comunidad de HMA. En otro estudio Pérez *et al.* (2016) determinaron que incrementar la concentración de P en el suelo produce un aumento en la conductividad eléctrica y, modifica los potenciales osmóticos, lo que conduce a cambios en la diversidad y el número de esporas. Landis *et al.* (2004) encontraron una relación significativa entre la riqueza de taxa y la composición de las comunidades de plantas con los HMA, ambas afectadas por los contenidos de N y P del suelo. Sin embargo, esta relación está vinculada con condiciones específicas en sitios particulares.

Otro factor que es importante considerar en los bosques templados, pero que ha sido poco explorado, es la radiación solar, ya que estos bosques presentan una dinámica de claros en el dosel, que pueden formar parte de la dinámica natural del bosque o ser ocasionados por actividades antrópicas y que, dan como resultado una elevación en la temperatura del suelo y ambiental (Muscolo *et al.*, 2014). Los cambios en la radiación solar modifican a la simbiosis micorrízica arbuscular debido a que la cantidad y calidad de luz que reciben las plantas modelan o alteran las tasas de fotosíntesis en las plantas y la traslocación de carbono destinado a la comunidad de HMA presente (Neuenkamp *et al.*, 2021). Ante una baja disponibilidad de luz, la asignación de carbono por parte de la planta se prioriza hacia estructuras aéreas como las hojas, lo que perjudica el mantenimiento de la simbiosis micorrízica arbuscular, mientras que, en una alta intensidad de luz, se ve incrementada la colonización de las raíces y la producción de esporas, debido a que existe un mayor flujo de C de la parte aérea de la planta al hongo que coloniza la raíz (Davison *et al.*, 2021).

La reducción de la disponibilidad de luz afecta al desarrollo de las plantas y al

establecimiento de los HMA (Smith y Read, 2008). En el trabajo de Zou *et al.* (2021), realizado en un bosque de coníferas subtropical de la Reserva Natural de Lushan, China, encontraron una mayor riqueza y diversidad de HMA en el dosel cerrado que en los claros de dosel. Además de que el dosel cerrado reflejó correlaciones positivas entre los HMA y las propiedades del suelo como el nitrógeno total, el contenido de materia orgánica, el pH y el fósforo disponible. En pastizales sombreados se ha reportado la presencia de familias de HMA como *Claroideoglomeraceae* y *Ambisporaceae* asociadas con las raíces de las plantas hospedantes (Neuenkamp *et al.*, 2020).

Los patrones de esporulación de los taxa de HMA son también influenciados por los cambios temporales. La esporulación de los HMA responde a los cambios de humedad y de temperatura del suelo, lo que modifica la riqueza y abundancia de algunas especies (Dumbrell *et al.*, 2011). Es importante mencionar que los bosques templados presentan una estacionalidad marcada, determinada por los cambios en la temperatura y la precipitación a lo largo del año (Sánchez *et al.*, 2003), por lo que la humedad puede ser un factor que afecte a la composición de HMA. En el trabajo realizado por Ramírez *et al.* (2019), en un transecto altitudinal de los Andes tropicales colombianos, observaron una variación estacional en la abundancia y diversidad de HMA, reportando que durante la temporada lluviosa encontraron 31 especies de HMA y hubo una mayor abundancia de esporas en altitudes bajas, mientras que, en la temporada de secas reportaron 46 especies de HMA y una mayor abundancia de esporas en altitudes superiores. Durante la temporada de secas, los hongos incrementan su producción de estructuras de resistencia como las esporas (Violi *et al.*, 2008; Looby *et al.*, 2016). Por otra parte, Teixeira-Rios *et al.* (2018) reportaron para un bosque tropical seco un mayor número de propágulos micorrízicos en la estación seca (mayo a agosto), pero no encontraron diferencias significativas en el número de esporas y en la composición de la comunidad de HMA. La formación de la micorriza arbuscular puede verse afectada por fenología de las plantas hospedantes presentes, y su respuesta ante los cambios de humedad y nutrientes que pueden llevar a promover la colonización micorrízica sobre la esporulación (Maia *et al.*, 2010).

Los factores bióticos y abióticos actúan de manera simultánea en la naturaleza, incidiendo sobre la composición de y actividad de la microbiota edáfica, así como sobre la estructura de las comunidades vegetales. Esto subraya la necesidad de enfocar estudios que permitan ampliar y profundizar nuestro entendimiento de los efectos que pueden tener estos factores sobre los componentes fundamentales de la microbiota edáfica, como la comunidad de HMA en los bosques templados. Es importante mencionar que, en estos ecosistemas en particular, la

mayoría de los estudios se centran en conocer la diversidad taxonómica de los hongos ectomicorrícicos, mientras que son escasos los trabajos que abordan la taxonomía y la importancia ecológica de los HMA. Este vacío de conocimiento es aún más pronunciado en los bosques templados de México.

## 2. Justificación

El estudio de la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en los bosques templados resulta de gran importancia, dada su función clave en la resiliencia de estos ecosistemas. Se sabe que los HMA influyen en la productividad de las plantas en sistemas naturales (Lugo *et al.*, 2007), y en la estructura de la comunidad vegetal favoreciendo el establecimiento, la supervivencia y la reproducción de algunas especies, al incrementar la cantidad de nutrientes y de agua que pueden ser absorbidos por su planta hospedante, además de estimular la resistencia de las plantas ante diversos factores bióticos y abióticos de estrés. La composición de la comunidad de HMA desempeña un papel crítico en su habilidad para cumplir diversas funciones en los ecosistemas. Esto se debe a que las diferentes especies de HMA no comparten los mismos atributos biológicos. La diversidad en la comunidad de HMA permite una diferenciación en procesos como la absorción de nutrientes por las plantas hospederas, la resistencia contra patógenos y la contribución al reciclaje de nutrientes en el suelo. De manera que el conocimiento de la composición de la comunidad de HMA cobra mayor relevancia.

La comunidad de HMA en simbiosis micorrícica arbuscular con las plantas en los ecosistemas, forma una red de micelio muy compleja en el subsuelo, que interconecta a individuos de la misma o de diferentes especies de plantas; esta red contribuye a la estructura y estabilidad edáfica (Toju *et al.* 2018). Sin embargo, el establecimiento de dicha asociación simbiótica está limitada por algunos factores que pueden afectar a los HMA y traer cambios en las comunidades de los bosques. El interés en este sistema se debe a que el conocimiento sobre dichos microorganismos se ha evaluado desde la perspectiva de la colonización en las raíces de las plantas y se ha dado prioridad a sistemas agrícolas por la utilidad que tienen estos organismos para el desarrollo de los cultivos. No obstante, cabe recordar que, a nivel global, los bosques templados han sido fuertemente afectados por disturbios antrópicos. El bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. (Pinaceae) de la cuenca del río Magdalena, no es la excepción, ya que forma parte de la vegetación remanente ubicada dentro de la Ciudad de México, cumple un papel importante en los ciclos biogeoquímicos y proporciona una variedad de servicios ecosistémicos; sin embargo, el crecimiento de la mancha urbana ha sido uno de los

principales impulsores del cambio en la estructura de la vegetación del bosque, que afecta los servicios ecosistémicos de este ecosistema templado (Almeida-Leñero *et al.*, 2007). Además, los HMA, al formar la simbiosis micorrícica arbuscular sustentan el crecimiento, la nutrición y la salud de una amplia diversidad de plantas que son un recurso biótico medicinal, comestible y con otros usos, materiales e inmateriales, importantes para los seres humanos. Por lo que, este trabajo proporcionará información sobre la comunidad de HMA, para contribuir al conocimiento de la diversidad fúngica en este tipo de ecosistema templado, así como encontrar si los patrones de riqueza de estos hongos responden a diferentes factores bióticos o abióticos.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Conocer la composición de hongos micorrizógenos arbusculares y su relación con la composición florística en un gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del río Magdalena, y la influencia de algunas variables abióticas sobre éstas.

#### **3.2. Objetivos particulares**

- Reportar la composición y riqueza de especies de HMA en tres sitios con diferente altitud durante la temporada seca y lluviosa.
- Obtener la composición y riqueza de la comunidad florística en tres sitios con diferente altitud durante la temporada seca y lluviosa.
- Conocer el efecto que tienen las variables abióticas de cada sitio sobre la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares y la comunidad de plantas.

### **4. Hipótesis**

Los hongos micorrizógenos arbusculares influyen sobre la composición de la comunidad florística de los ecosistemas, al favorecer el establecimiento de algunas especies y limitar el de otras, por lo que se espera una relación positiva y significativa entre la composición de HMA y la vegetal.

Se sabe que existen cambios de las variables edáficas y ambientales que dependen de la altitud y la estacionalidad de la lluvia, los cuales, a su vez, determinan la riqueza y composición

de hongos micorrizógenos arbusculares, por lo que, la composición taxonómica de estos organismos simbióticos será diferente entre la temporada de lluvias y secas, y a lo largo del gradiente altitudinal. Ciertas especies de HMA incrementarán su abundancia durante la temporada seca, lo que demuestra su capacidad de adaptación a condiciones de menor humedad al aprovechar de manera estratégica los cambios temporales en los patrones de precipitación.

## 5. Materiales y métodos

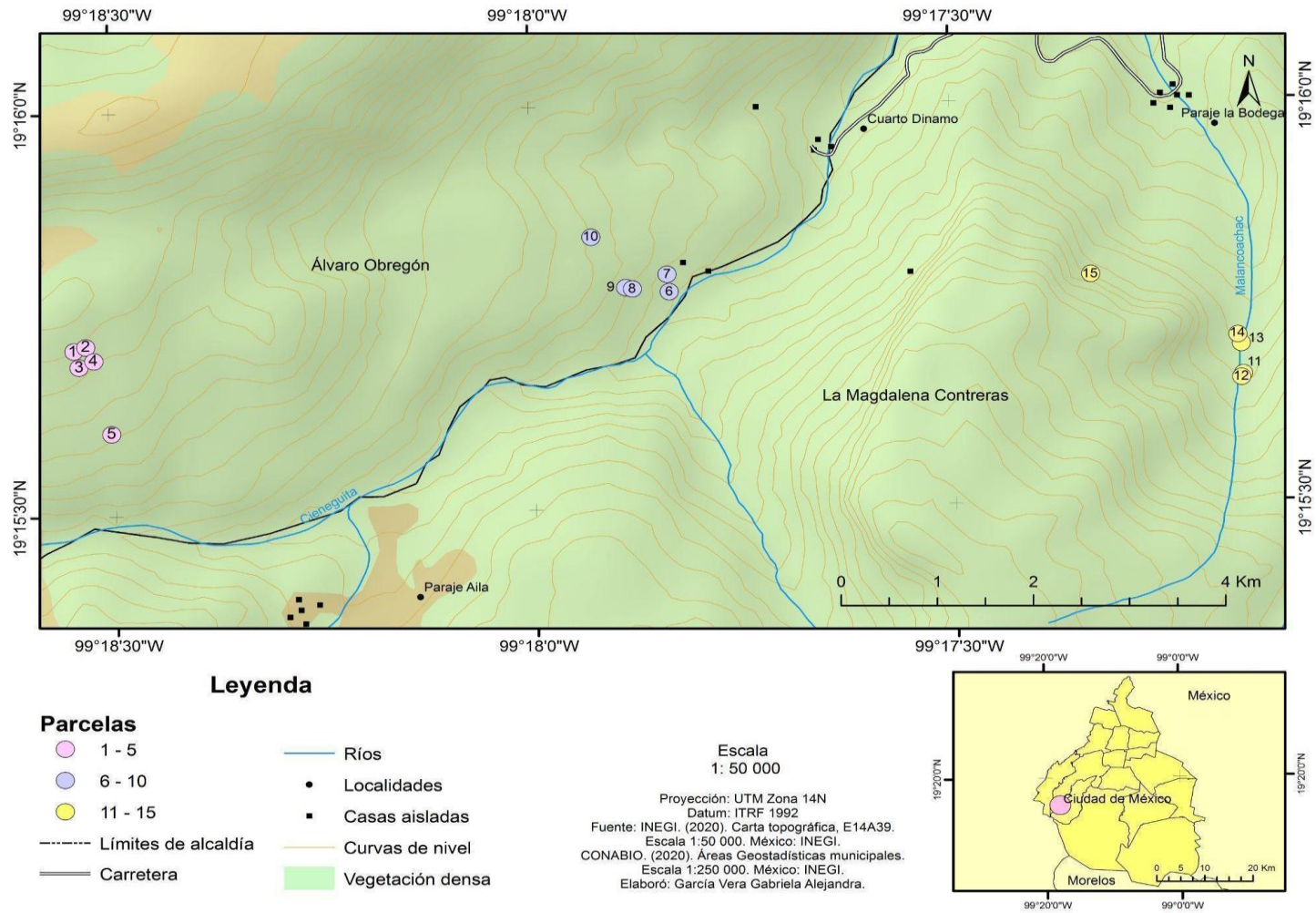
### 5.1. Zona de estudio: Bosque de *Abies religiosa*

El bosque de *Abies religiosa* o también conocido como bosque de oyamel, es la vegetación con mayor extensión en la cuenca del río Magdalena (CRM), ocupando el 37.8 % del área total. Su gradiente altitudinal se localiza entre los 2 750 m s. n. m. y los 3 650 m s. n. m; posee un relieve accidentado y su clima es templado húmedo. La temperatura media anual es de 13 °C y tiene una precipitación anual de 1 250 mm. Presenta una marcada temporalidad ocasionada por los cambios en la temperatura y la precipitación durante el año; así, la temporada de lluvias ocurre de mayo a octubre y la temporada seca de noviembre a abril (Rzedowski, 1991; Galeana-Pizaña *et al.*, 2013; Morales-Rojas, 2015). En este bosque se desarrollan suelos de tipo Andosol húmico, que son suelos derivados de material volcánico, presentan complejos órgano-minerales, por lo que tienen una alta capacidad de fijar el fósforo, y suelos Pheozem, que son suelos oscuros con moderado a alto contenido de materia orgánica sin carbonatos secundarios (Santibañez-Andrade, 2009; INTAGRI, 2017).

La disponibilidad de nitrógeno es alta (8.5 %), mientras que la de fósforo es baja (<0.001 %) y se encuentra húmedo la mayor parte del año (Delgadillo-Durán, 2011; Facio-López, 2015; Vázquez-Santos *et al.* 2021). Es un bosque medianamente denso, con dosel de 20 a 30 m de altura. El estrato arbustivo está dominado por *Acaena elongata* L., *Roldana angulifolia* (DC.) H. Rob. & Brettell, *Senecio barba-johannis* DC., *Eupatorium pazcuarensis* Kunth, *Thuidium delicatulum* (Hedw B. S. G.) Mitt., *Salvia elegans* Vahl y *S. concolor* Lamb. ex Benth., sólo en algunos sitios se encuentra un estrato rasante, compuesto por musgo principalmente, con coberturas menores al 15 % (Nava-López, 2003; Almedia-Leñero, 2007; Facio-López, 2015).

Entre las principales actividades antrópicas que afectan a este bosque se han reportado las agrícolas de pastoreo y de chaponeo forestal, que alteran a la comunidad vegetal y modifican las condiciones microambientales de humedad, de luz y de temperatura del suelo (Mota-Villanueva 2022).

Dentro del bosque de *Abies religiosa* se seleccionaron tres sitios con diferente altitud, con base en los datos ambientales del estudio realizado por Tovar-Bustamante (2017) (Fig. 1). Para cada sitio se establecieron cinco parcelas de 100 m<sup>2</sup> como se muestra en la Figura 1 (n= 15).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la zona de estudio y de las parcelas muestreadas dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.



En el cuadro 1 se pueden observar algunas propiedades químicas del suelo que han sido reportadas dentro del grupo de investigación del laboratorio de Dinámica de Comunidades de la Facultad de Ciencias, UNAM, en diferentes puntos del bosque de *Abies religiosa* desde el año 2012 hasta el año 2017.

**Cuadro 1.** Valores promedio  $\pm$  error estándar de las propiedades químicas del suelo del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena durante la temporada de lluvias y de secas. Datos pertenecientes a muestras recolectadas en el periodo 2012-2017.

Temporada	pH	C.E.	MO (%)	P (ppm)	Nt (%)
		1:5 H <sub>2</sub> O mmhos/c dSm <sup>-1</sup>	Walkley- Black	Olsen	Kjeldahl
Lluvias	5.94 $\pm$ 0.4	0.08 $\pm$ 0.1	25.01 $\pm$ 5.7	7.0 $\pm$ 4.4	0.72 $\pm$ 0.2
Secas	5.98 $\pm$ 0.2	0.08 $\pm$ 0.02	19.93 $\pm$ 4.79	55.87 $\pm$ 3.5	0.60 $\pm$ 0.6

Dónde: CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, P= fósforo y Nt= nitrógeno total.

## 5.2. Variables abióticas

Para cada parcela seleccionada, se registraron los datos geográficos y de relieve: la altitud y las coordenadas geográficas, mediante un GPS (Garmin eTrex 10), la pendiente con un clinómetro de brújula tipo Brunton y la orientación de la ladera por medio de una brújula (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Datos geográficos de los tres sitios de muestreo ubicados dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

Sitios	Altitud (m s. n. m.)	Pendiente	Orientación	Coordenadas
Sitio 1: Valle de Temamatla	~ 3455 m s. n. m.	~ 25.03 °	NO -SE	19° 15' 42.3684" N, 99° 18' 30.2251" O
Sitio 2: El Jarillal	~ 3199 m s. n. m.	~ 13.93 °	E	19° 15' 46.1160" N 99° 17' 55.7191" O
Sitio 3: Copilco	~ 3100 m s. n. m.	~ 19.3 °	N- NE	19° 15' 39.3480" N 99° 17' 20.0846" O

Dónde: NO= noroeste, NE= noreste, SE= sureste, E= este, N= norte.

Durante un año se obtuvo la temperatura mensual registrada mediante hobos DATA loggers (easyLog USB-ONSET, Massachusetts, EUA). Para conocer la cantidad de luz y la apertura

del dosel, se tomaron fotografías hemisféricas usando una cámara Nikon (D80, EUA) con un lente ojo de pescado (EX SIGMA 4.5 mm f/2.8 DC HSM, EUA) orientando la cámara hacia el norte geográfico y posicionándola a nivel del suelo en el centro de la parcela. Las fotografías hemisféricas fueron analizadas en el programa Gap Light Analyzer, 2.00 (versión 1999).

Se midieron algunas variables edáficas como el porcentaje de humedad relativa a través de la recolecta de 250 g de suelo procesados por el método gravimétrico de Reynolds (1970); los datos obtenidos se procesaron como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad del suelo} = \frac{\text{Peso de suelo húmedo}}{\text{Peso del suelo seco}} \times 100 \%$$

Adicionalmente, se recolectaron 300 g de suelo de cada parcela para realizar un análisis químico edáfico en el Laboratorio de fertilidad de suelo del Colegio de Posgraduados (COLPOS), donde se obtuvieron valores de pH en agua, en una la relación 1:2 (Bates, 1964), conductividad eléctrica (CE) de acuerdo a la relación 1:5 y un puente de conductividad (Jackson, 1982), porcentaje de materia orgánica (M.O %) por medio de una digestión húmeda (Walkley y Black, 1934), nitrógeno total (N) mediante una digestión húmeda con una mezcla de ácido sulfúrico y una destilación semi-micro Kjeldahl por arrastre de vapor y titulación con ácido sulfúrico 0.05 N (Bremner, 1965) y fósforo disponible (P) con una extracción de NaHCO<sub>3</sub> al 0.5 M, con un pH 8.5, el cual es un buen extractante para un amplio rango de valores de pH y determinación colorimétrica (Olsen *et al.*, 1954, Cuadro 3). Debido a que los suelos se tomaron en diferentes altitudes, esperábamos encontrar no solamente suelos con un pH ácido o ligeramente ácido por lo que se optó por tal método.

**Cuadro 3.** Valores promedio  $\pm$  error estándar de las variables abióticas, ambientales y edáficas de los tres sitios de muestreo del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

Sitio	Tempo rada	T (°C)	Luz (%)	HRS (%)	pH	CE ( $\mu\text{mho/cm}$ )	M.O (%)	P dis ppm	N total (ppm)
S1	LL	6.73 $\pm 0.13$	13.95 $\pm 1.67$	48.11 $\pm 1.79$	5.54 $\pm 0.27$	0.09 $\pm 0.3$	28.35 $\pm 4.3$	6 $\pm 1.24$	0.83 $\pm 0.12$
	S	11.94 $\pm 0.19$	27.19 $\pm 4.99$	32.01 $\pm 3.96$	5.74 $\pm 0.20$	0.06 $\pm 0.01$	22.52 $\pm 2.93$	4.71 $\pm 0.73$	0.62 $\pm 0.1$
S2	LL	9.3 $\pm 0.09$	18.27 $\pm 0.94$	42.88 $\pm 3.34$	6.13 $\pm 0.12$	0.06 $\pm 0.01$	25.36 $\pm 4.24$	6.25 $\pm 0.83$	0.7 $\pm 0.06$
	S	12.59 $\pm 0.72$	22.92 $\pm 3.81$	26.3 $\pm 0.99$	6.08 $\pm 0.11$	0.08 $\pm 0.01$	18.33 $\pm 1.52$	5.67 $\pm 2.94$	0.58 $\pm 0.06$
S3	LL	10.07 $\pm 0.18$	15.59 $\pm 2.86$	42.54 $\pm 2.8$	6.16 $\pm 0.21$	0.08 $\pm 0.01$	21.31 $\pm 3.37$	5.8 $\pm 0.96$	0.63 $\pm 0.11$
	S	12.78 $\pm 0.77$	24.87 $\pm 2.46$	30.74 $\pm 11.0$	6.10 $\pm 0.16$	0.08 $\pm 0.02$	18.92 $\pm 5.20$	5.69 $\pm 1.44$	0.58 $\pm 0.1$

Dónde: LL= lluvias, S= secas, T= temperatura, HRS= humedad relativa del suelo, CE= conductividad eléctrica, M.O %= porcentaje de materia orgánica.

### **5.2.1 Recolecta de muestras biológicas**

Se llevaron a cabo dos recolectas de 250 g de suelo en cinco parcelas ubicadas en cada sitio, una recolecta en septiembre del año 2017, perteneciente a la temporada lluviosa, y otra recolecta en marzo del 2018 correspondiente a la temporada seca. En cada parcela se removió el mantillo y se tomaron tres muestras de suelo al azar dentro de los primeros 20 cm del suelo mineral (n= 3), que constituyeron una muestra compuesta al ser mezcladas homogéneamente (Gutiérrez, 1997; Ruiz, 1997). Posteriormente, las muestras se llevaron al laboratorio, fueron secadas a temperatura ambiente, tamizadas (0.71 mm, 0.177 mm y 0.0044 mm) y etiquetadas para realizar más adelante la extracción de esporas. Estas muestras de suelo fueron almacenadas en bolsas de plástico, en un lugar oscuro y libre de humedad durante dos años, debido a que estas muestras formaron parte del proyecto sobre diversidad funcional en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena. Las muestras de suelo se retomaron en el año 2019, para realizar la extracción de esporas.

### **5.2.2 Caracterización de la comunidad vegetal**

Simultáneamente a la recolecta de suelo, en cada parcela se realizó el registro de datos para caracterizar a la comunidad vegetal, dicha caracterización se realizó en septiembre del 2017 (temporada de lluvia) y en marzo del 2018 (temporada seca), con el objetivo de observar los cambios en la estructura de la comunidad vegetal determinados por la temporalidad y el espacio. La identificación de la comunidad vegetal se realizó a través de la comparación y contrastación de los especímenes de las áreas de estudio con los ejemplares del micro herbario del laboratorio de Dinámica de Comunidades de la Facultad de Ciencias, UNAM, y mediante el uso de claves taxonómicas de diferentes grupos de plantas.

## **5. 3 Trabajo de laboratorio**

### **5.3.1 Cultivos trampa**

Se montaron cultivos trampa para estimular la esporulación de los HMA. Dado que las muestras del suelo habían presentado un almacenamiento de dos años, se tomó la decisión de montar cultivos trampa para estimular la esporulación de los HMA y conocer la presencia de especies

de HMA que sean tolerantes al almacenamiento o a posibles cambios en las condiciones ambientales.

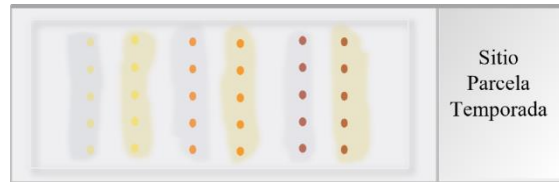
Se germinaron semillas de sorgo (*Sorghum* spp.) que ha demostrado ser un hospedante adecuado para la producción de propágulos micorrícicos utilizando como sustrato el suelo del bosque de *Abies religiosa* de la CRM, en el invernadero de la Facultad de Ciencias, UNAM, el cual se mantiene a una temperatura de 25 °C y un 80 % de humedad ambiental relativa (Olivera-Morales *et al.*, 2011, Díaz-Parra *et al.*, 2019). Se regaron dos veces por semana durante tres meses, posteriormente se dejaron de regar con el propósito de someter a las plantas a estrés hídrico y promover la esporulación de HMA. Una vez que el suelo se secó, se tamizaron 250 g para obtener una muestra que no tuviera raíces ni partículas de suelo grandes, para la extracción de esporas.

### **5.3.2 Extracción de esporas (método de Brundrett *et al.*, 1996)**

Se tomaron 100 g de suelo finamente tamizado, provenientes de los cultivos de propagación, que fueron colocados en vasos de precipitado donde se les adicionó agua. Se prepararon tamices con diferentes aperturas de malla, estos fueron de 0.710 mm (mayor apertura), y 0.044 mm (menor apertura) y se colocaron dentro de una tarja. El contenido del último tamiz (0.044 mm) se vació en tubos para macro-centrífuga de 50 ml y se aforaron con agua hasta 45 ml. Posteriormente se centrifugó a 3500 rpm durante 4' 25" y se eliminó el sobrenadante. Se suspendió el sedimento de cada tubo en 45 ml de sacarosa al 50 % para volver a centrifugar a 3500 rpm durante 1' 30" (Álvarez- Sánchez y Monroy, 2008). Se pasó el sobrenadante por un tamiz de malla fina ( $\leq 40$  micrómetros), se enjuagó con abundante agua y se pasó a una caja Petri (Ver anexo 1) Esta muestra se observó en el microscopio estereoscópico (Nikon SMZ-745T).

### **5.3.3 Montaje de esporas en preparaciones fijas (Koske y Tessier 1983; Brundrett *et al.*, 1966)**

Las esporas aisladas en el tamiz  $\leq 40$  micrómetros se lavaron con Tween 80 al 10 %. Se separaron con ayuda de una aguja de disección. Se humedeció la punta de la aguja de disección en el medio de montaje y en el microscopio estereoscópico se tomó la mitad de las esporas y se colocaron en el alcohol polivinílico lactoglicerol (PVLG) y la otra mitad en el PVLG + reactivo de Melzer (Fig. 3).



**Figura 2.** Montaje de esporas en portaobjetos. Elaboración propia (2021).

Se etiquetaron las preparaciones usando una etiqueta adhesiva. Se aplicó presión ligera sobre cada espora hasta abrirla. Con esto se expusieron los estratos de la pared y su posible reacción al reactivo de Melzer. Se secaron las preparaciones a 50° C en un horno por 48 horas antes de observarlas al microscopio óptico.

Para llevar a cabo la identificación de las especies HMA, se empleó un enfoque que involucró la comparación y contraste de las características morfológicas de las esporas con descripciones especializadas de géneros y especies pertenecientes a Glomeromycota, así como con información taxonómica disponible en la Colección Internacional de Cultivos de Hongos Micorrícicos Arbusculares (INVAM) (<http://invam.wvu.edu/the-fungi/classification>), y en el sitio web de Blaszkowski (<http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/>). Estos análisis se realizaron siguiendo el marco taxonómico propuesto por Schüßler y Walker (2010), así como las pautas de Redecker *et al.* (2013). Las esporas cuyas características morfológicas coincidían con las de un género, pero no correspondían a ninguna especie previamente descrita en ese género, se etiquetaron como "sp." y se numeraron de manera secuencial. Adicionalmente, se empleó la etiqueta "aff." para identificar aquellas esporas cuya morfología presentaba variaciones en términos de color, tamaño o rasgos similares en comparación con la descripción de la especie más similar.

### 5.3.4 Caracterización morfológica de las esporas de los HMA

Para conocer a la comunidad de HMA presente en el suelo del bosque de *Abies religiosa* de la CRM se determinó a las especies de la comunidad de hongos a través de la morfología de sus esporas. Las esporas al ser estructuras de resistencia que pueden permanecer viables varios años en el suelo, es posible conocer su viabilidad a través de la condición en la que se encuentren, por ejemplo, superficie intacta, contenido lipídico integral y consistencia (Paz *et al.*, 2021). Se identificaron características morfológicas como el color, la forma y el tamaño de las esporas; el número, estructura y grosor de la pared de la espora; los tipos de ornamentaciones en los componentes más externos de la pared (excepto en *Gigaspora*); el tipo y la posición de la

conexión hifal de las esporas; la formación de un tubo germinativo y la reacción al reactivo de Melzer (Velázquez *et al.*, 2020) (ver Fig. 2 y Fig. 3). Las muestras de esporas reflejan un registro constantemente actualizado de la reproducción reciente de HMA siendo un buen método para estudiarlas a nivel de comunidad (Landis *et al.*, 2004).



**Figura 3.** Características morfológicas de importancia taxonómica esporas de HMA. Elaboración propia (2021).

## 6. Análisis estadísticos

Para conocer la agrupación de los sitios de acuerdo con las especies que los integran y así poder visualizar si eran semejantes o no, se calculó el índice de Jaccard con el programa de R versión 4.1.0 para conocer el grado de similitud de acuerdo con la composición de especies de HMA entre los tres sitios muestreados. Se realizó un escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) en el programa R versión 4.1.

Se elaboró un clúster de dos vías empleando el programa de PC-ORD ver. 7.07 con el propósito de conocer cómo se estructura la comunidad de HMA en relación con los sitios muestreados. Para ello se elaboró una base de datos de presencia-ausencia, se empleó la medida de distancia de Jaccard y el agrupamiento por el método de Ward con línea de corte al 50 %.

Se realizó un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA) para corroborar la composición entre los sitios muestreados en ambas temporadas y la comunidad de HMA encontrada empleando el programa de PC-ORD ver. 7.07, con 999 iteraciones.

Para asociar la vegetación con la comunidad de HMA se realizó un análisis de correspondencia canónica (CCA), para ello se elaboró una base de datos con los registros de presencia-ausencia de las especies de la vegetación y de las especies de hongos encontrados en los sitios muestreados, debido a que las muestras de suelo no se tomaron cercanas a la presencia

de alguna planta en particular. El análisis se realizó empleando el programa de PC-ORD ver. 7.07 estandarizados por el método de Hill's (1979) con 999 permutaciones.

## 7. Resultados

### 7.1. Composición y riqueza de HMA

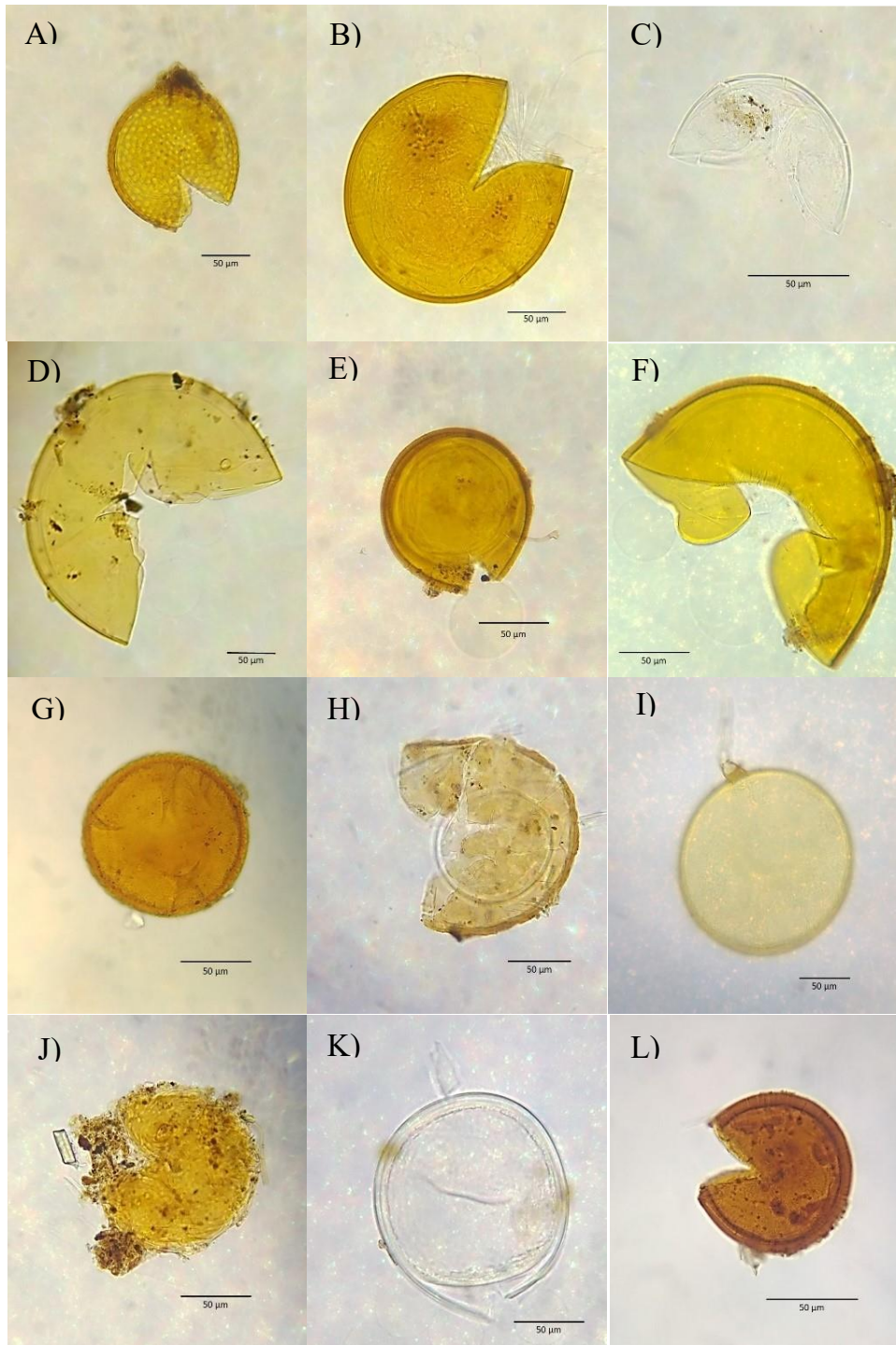
La comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares estuvo representada por dos clases Archaeosporomycetes y Glomeromycota, cuatro órdenes Archaeosporales, Diversisporales, Entrophosporales y Glomerales, seis familias y 24 especies (Cuadro 4) (Salmerón-Santiago *et al.* 2015). El género con mayor número de especies fue *Acaulospora* con 12 especies de las 24 registradas en México, seguido de *Glomus* que tuvo seis especies, mientras que el resto de los géneros tuvieron entre 1 y 2 especies (Fig. 4). Durante la temporada de lluvias se registraron 20 especies y en la temporada de secas 14. Las especies presentes sólo durante la temporada seca fueron, *Acaulospora rehmi*, *Ambispora appendicula*, *Acaulospora* aff. *ignota* y *Acaulospora* aff. *spinossisima*; mientras que *A. delicata*, *A. spinosa*, *Entrophospora claroidea*, *Funneliformis mosseae*, *Glomus glomerulatum*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Acaulospora* aff. *tortuosa*, *Acaulospora* sp. 2, *Glomus* sp. 1 y *Rhizophagus* sp. 1, tuvieron presencia exclusiva en la temporada de lluvias (ver Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Listado de especies de hongos micorrizógenos arbusculares encontrados en los tres sitios muestreados en ambas temporadas en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, Cd. Mex., México.

Clase (2)	Orden (4)	Familia (6)	Especie (24)	Temporada presente	Sitio		
Archaeosporomycetes	Archaeosporales	Ambisporaceae	<i>Ambispora appendicula</i> . (Spain, Sieverd. & N.C. Schenck) C. Walker	S	S2		
			<i>Ambispora gerdemanni</i> (S.L. Rose, B.A. Daniels & Trappe) C. Walker, Vestberg & A. Schüßler	A	S1, S2, S3		
		Archaeosporaceae	<i>Archaeospora trappei</i> (R.N. Ames & Linderman) J.B. Morton & D. Redecker	A	S1, S2		
Glomeromycetes	Diversisporales	Acaulosporaceae	<i>Acaulospora alpina</i> Oehl, Sýkorová & Sieverd.	A	S1, S2, S3		
			<i>Acaulospora colombiana</i> (Spain & N.C. Schenck) Kaonongbua, J.B. Morton & Bever	A	S1, S3		
			<i>Acaulospora delicata</i> C. Walker, C.M. Pfeiff. & Bloss	LL	S1, S2, S3		
			<i>Acaulospora laevis</i> Gerd. & Trappe	A	S1, S3		
			<i>Acaulospora mellea</i> Spain & N.C. Schenck	A	S1, S2, S3		
			<i>Acaulospora morrowiae</i> Spain & N.C. Schenck	A	S2		
			<i>Acaulospora rehmii</i> Sieverd. & S. Toro	S	S2		
			<i>Acaulospora spinosa</i> C. Walker & Trappe	LL	S2, S3		
			<i>Acaulospora</i> aff. <i>ignota</i>	S	S2, S3		
			<i>Acaulospora</i> aff. <i>spinosissima</i>	S	S1		
			<i>Acaulospora</i> aff. <i>tortuosa</i>	LL	S2		
			<i>Acaulospora</i> sp. 2	LL	S1		
			Entrophosporales	Entrophosporaceae	<i>Entrophospora baltica</i> Błaszk., Madej & Tadych	A	S1, S2
					<i>Entrophospora claroidea</i> (N.C. Schenck & G.S. Sm.) Błaszk., Niezgoda, B.T. Goto & Magurno	LL	S2, S3
			Glomerales	Glomeraceae	<i>Funneliformis mosseae</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler	LL	S1,S2,S3
					<i>Funneliformis geosporus</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler C. Walker & Schuessler	A	S1, S3
					<i>Glomus glomerulatum</i> Sieverd	LL	S1
<i>Rhizophagus clarus</i> (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) C. Walker & A. Schüßler	A	S1, S2, S3					
<i>Rhizophagus fasciculatus</i> C. Walker & Schuessler	LL	S1					
<i>Glomus</i> sp. 1	LL	S3					
<i>Rhizophagus</i> sp. 1	LL	S1, S3					

Donde S: secas, LL: lluvias, A: ambas temporadas. Donde el número en paréntesis representa la cantidad de grupos taxonómicos. S1: sitio 1, S2: sitio 2, S3: sitio 3.





**Figura 4.** Fotografías de algunas de las especies de HMA observadas en suelo del bosque de *Abies religiosa* de la CRM. Dónde: A) *Acaulospora alpina*, B) *A. colombiana*, C) *A. delicata*, D) *A. laevis*, E) *A. mellea*, F) *A. aff. spinosissima*, G) *Acaulospora* sp. 2, H) *Ambispora gerdemannii*, I) *Funneliformis mosseae*, J) *Glomus* sp. 1, K) *Rhizophagus clarus*, L) *Rhizophagus fasciculatus*.

## 7.2. Especies compartidas

El sitio 1, que fue el de mayor altitud, presentó 16 especies de HMA, seguido del sitio 2, con 15 especies y el sitio 3, en la altitud más baja, 14 especies. En relación con las especies compartidas, el sitio 1 y el sitio 3, comparten 10 especies de HMA, pese a encontrarse en altitudes distantes. El sitio 2 y el sitio 3 comparten 9 especies y el sitio 1 y el sitio 2 comparten 8 especies (Fig. 6).



**Figura 5.** Diagrama de Venn que muestra el número de especies de HMA compartidas entre los sitios. Sitio 1= mayor altitud, Sitio 2= altitud media, Sitio 3= menor altitud.

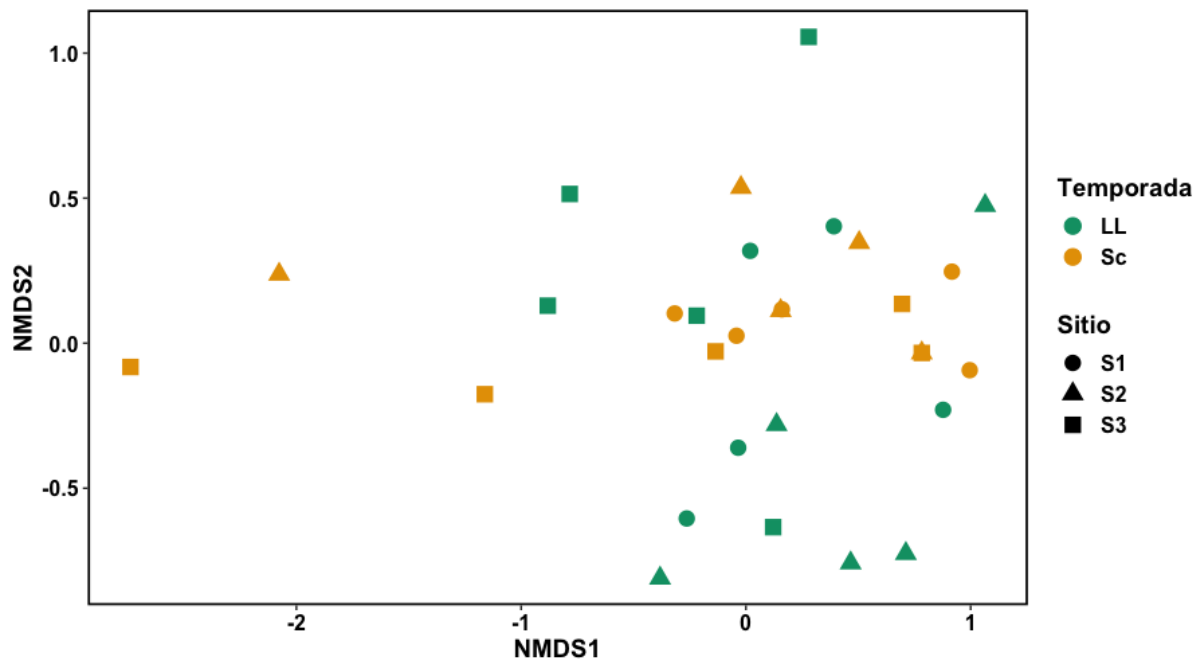
El índice de Jaccard para determinar la similitud entre los sitios con diferente altitud nos arrojó los siguientes resultados (ver Cuadro 5). El sitio 2 y el sitio 3 tuvieron la mayor disimilitud, el sitio 1 y el sitio 3 compartieron el 52 % de las especies, mientras que el sitio 1 y 2 compartieron el 63 % de especies. Las especies en común incrementan el porcentaje de similitud entre sitios, mientras que la presencia de especies exclusivas de un sitio disminuye su porcentaje de similitud con el resto.

**Cuadro 5.** Valores de los coeficientes del índice de Jaccard.

Sitios	1	2	3
1	0	63 %	52 %
2		0	2 %
3			0

Para visualizar la ordenación de las especies compartidas se elaboró un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS). La altitud representada a través de los

sitios, no mostró un bien patrón definido (Fig. 7), la agrupación del sitio 1, el de mayor altitud, fue semejante al del sitio 2, mientras que el sitio 3, el de menor altitud, comparte algunas especies con los sitios anteriores, pero tiene otras especies que no se comparten como *Acaulospora* aff. *ignota* las cuales están aisladas del resto. Se observa una tendencia de especies que solo están presentes en lluvia y otras especies en secas. De manera general la mayoría de las especies se comparten entre ambas temporadas, siendo especies generalistas.



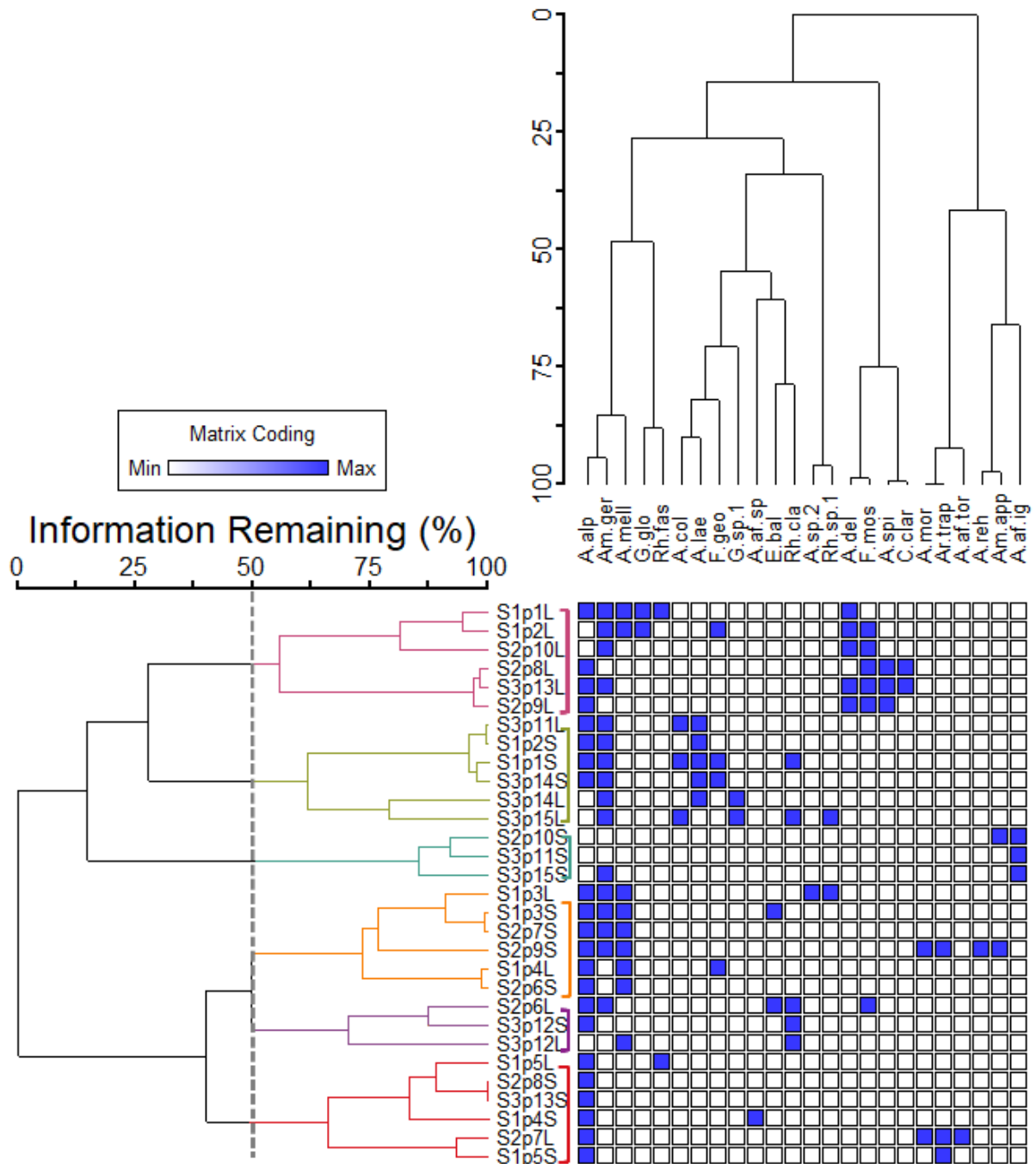
**Figura 6.** Análisis de escalamiento multidimensional no métrico NMDS que ordena a las especies de HMA dentro de los tres sitios del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena. Los valores presentados corresponden a los porcentajes del índice de Jaccard.

### 7.3 La altitud y los HMA

Para poder conocer el efecto de la altitud sobre los HMA se integró en una de base de datos las variables de sitio y parcela, donde fueron recolectadas las muestras de suelo de las cuales se identificaron los HMA presentes, en conjunto con la estacionalidad, para considerar como un solo factor los sitios y los cambios a los que están expuestos por la temporalidad propia del bosque templado. Los eigen-invalores para el eje 1 y para el eje 2 fueron de 0.263 y 0.251 respectivamente, nuestro resultado para la correlación entre las especies y el ambiente tuvo un valor de  $p=0.001$ . Los grupos propuestos obtenidos de este análisis reflejan la preferencia de las especies de HMA ante los cambios temporales en los sitios debidos al gradiente altitudinal

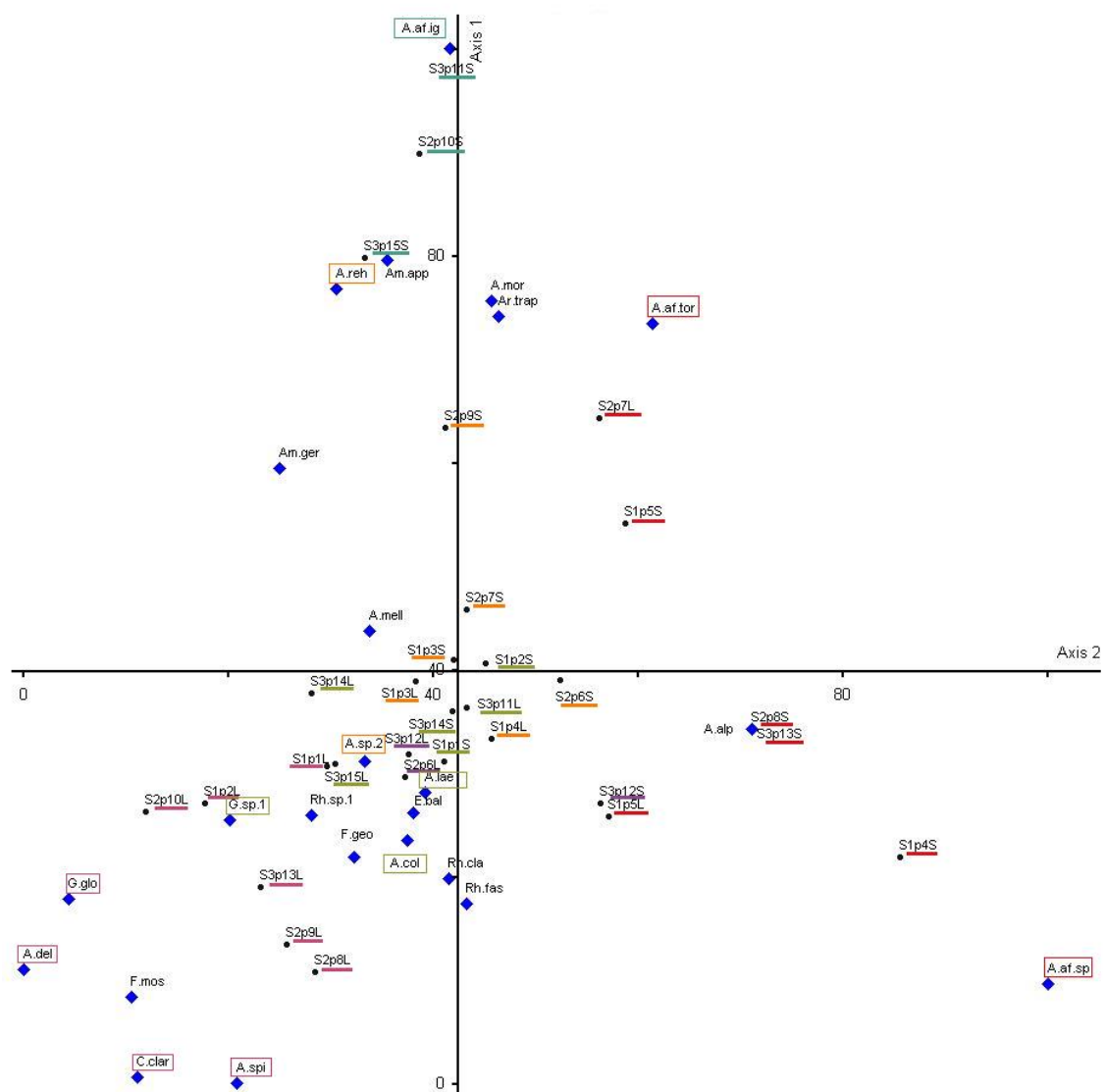
y a la temporalidad del ecosistema. De acuerdo con el clúster de dos vías en la comunidad de HMA se determinaron seis grupos principales en los sitios muestreados: color rosa= grupo 1, verde= grupo 2, azul= grupo 3, color naranja= grupo 4, morado= grupo 5, rojo= grupo 6, dichos grupos fueron determinados por el efecto de la estacionalidad. El grupo con mayor número de especies fue el 4 con once especies, seguido del grupo 1 y del grupo 3 con diez especies cada uno. El grupo 2 tuvo ocho especies, mientras que los grupos 5 y 6 presentaron seis especies cada uno.

Especies como *Acaulospora alpina* (A-alp) y *Ambispora gerdemannii* (Am-ge) estuvieron presentes en casi todos los grupos, excepto en los grupos 3 y 6, respectivamente, siendo estas las especies generalistas. Por otro lado, se encontraron especies exclusivas para el grupo 1: *Acaulospora delicata* (A-del), *Acaulospora spinosa* (A-spi), *Entrophospora claroidea* (C-cl) y *Glomus glomerulatum* (G-gl) son las representativas de este grupo. El grupo 2 se caracterizó por la presencia de tres especies: *Acaulospora colombiana* (A-col), *Acaulospora laevis* (A-lae) y *Glomus* sp. 1 (G-sp-1). En el grupo 3 sólo se ubicó a *Acaulospora aff. ignota* (A-af-ig). También se puede observar en la Fig. 8 que existieron especies únicas que restringieron su presencia a un sitio, parcela y temporada en específico. Por ejemplo, *Acaulospora* sp. 2 (A-sp-2) fue exclusiva del grupo 4 el sitio 1, parcela 3 durante la temporada de lluvias y *Acaulospora rehmi* (A-reh) en el grupo 4, sitio 2, parcela 9 durante la temporada de secas. En el grupo 6 fueron *Acaulospora aff. spinosissima* (A-af-sp) en el sitio 1, parcela 4, de la temporada de secas y *Acaulospora aff. tortuosa* (A-af-to) en el sitio 2, parcela 7 de la temporada de lluvias. El grupo 5 no presentó ninguna especie exclusiva (Fig. 8).



**Figura 7.** Clúster de dos vías utilizando la presencia-ausencia de las especies de HMA encontradas en cada sitio para ambas temporadas a un corte del 50 % de similitud. Color rosa= grupo 1, Verde= grupo 2, Azul= grupo 3, Color naranja= grupo 4, Morado= grupo 5, Rojo= grupo 6. La clave de las filas está compuesta por el número de sitio (S1-S3), seguido del número de la parcela (p1-p15), seguido de la temporada (S-L).

Para responder si hay diferencias en la temporalidad con los grupos de HMA se elaboró un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA). Los eigen-invalores para el eje 1 y para el eje 2 fueron de 0.76709 y 0.48595 respectivamente. En este análisis complementario de los seis grupos, se observó que el grupo 1 presentó especies que se distribuyeron en los tres sitios únicamente en la temporada lluviosa, el grupo 3 contuvo especies del sitio 2 y 3 únicamente de la temporada de secas y el grupo 6 contuvo especies de los tres sitios de ambas temporadas. El grupo 2 incluyó a especies presentes en el sitio 1 y sitio 3 de ambas temporadas. El grupo 4 contuvo a especies del sitio 1 y sitio 2 de ambas temporadas. El grupo 5 contenía especies del sitio 2 y 3 de ambas temporadas (Fig. 9).



**Figura 8.** Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA). Color rosa= grupo 1, Verde= grupo 2, Azul= grupo 3, Color naranja= grupo 4, Morado= grupo 5, Rojo= grupo 6. Dentro de los recuadros de color se indica a las especies exclusivas de cada grupo.

## 7.4 Composición y riqueza florística

La comunidad florística estuvo representada por 16 especies anuales durante la temporada de lluvias y 20 durante la temporada de secas (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Listado de especies de plantas encontrados durante la temporada de lluvias y de secas en el bosque de *Abies religiosa* de la Cuenca del río Magdalena.

Temporada	Especies
Lluvias	<i>Avena fatua</i> Sp. Pl. L.
	<i>Baccharis pteronioides</i> DC.
	<i>Bidens anthemoides</i> Sherff.
	<i>Cestrum anagyris</i> Dunal.
	<i>Cheilanthes sinuata</i> (Lag.) Domin.
	<i>Dichondra sericea</i> Sw.
	<i>Drymaria</i> sp, (L.)
	<i>Erigeron galeottii</i> (A.Gray ex Hemsl.) Greene.
	<i>Eupatorium oreithales</i> , Greenm
	<i>Hackelia mexicana</i> , I.M.Johnst
	<i>Iresine diffusa</i> , Humb. & Bonpl. ex Willd
	<i>Lupinus glabratus</i> , Rydb.
	<i>Partenium hysterophorus</i> , L.
	<i>Pinus montezumae</i> , Lamb.
	<i>Senecio sanguisorbae</i> , DC.
	<i>Solanum cervantesii</i> , Lag.
Secas	<i>Arenaria lanuginosa</i> , (Michx.) Rohrb.
	<i>Asplenium</i> sp
	<i>Astrolepis sinuata</i> , Sw.
	<i>Baccharis conferta</i> , Kunth.
	<i>Brassica campestris</i> , L.
	<i>Cerastium</i> sp
	<i>Cestrum laxum</i> , Benth.
	<i>Chimaphila umbellata</i> , (L.)
	<i>Duchesnea</i> sp

---

*Galium* sp  
*Garrya laurifolia*, Hartw. ex Benth.  
*Packera sanguisorbae*, (DC.) C.Jeffrey  
*Piqueria pilosa*, Kunth.  
*Pinus patula*, Schiede & Deppe ex Schldl.  
*Ribes ciliatum*, Humb. & Bonpl. ex Roem. & Schult.  
*Rubus liebmannii*, Focke.  
*Salix paradoxa*, Kunth.  
*Salvia mexicana*, L.  
*Solanum pubigerum*, Dunal.  
*Valeriana sorbifolia*, Kunth.

---

De acuerdo con la forma de vida de las plantas hospederas, se consideraron las plantas anuales debido a la respuesta que tienen ante cambios en las condiciones ambientales durante la temporada de secas y lluvias dentro de este bosque

**Cuadro 7.** Listado de plantas anuales registradas en los sitios de muestreo dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena.

Temporada	Especie	Sitio
Secas	<i>Brassica campestris</i> , Linnaeus.	S2
	<i>Plantago major</i> , Linnaeus.	S1
	<i>Solanum nigrescens</i> , M.Martens & Galeotti.	S2
Lluvias	<i>Hackelia mexicana</i> , I.M.Johnst.	S1, S2, S3
	<i>Iresine diffusa</i> , Humb. & Bonpl. ex Willd.	S3
	<i>Plantago major</i> , Linnaeus.	S1
	<i>Valeriana sorbifolia</i> , Kunth.	S1, S3
	<i>Solanum nigrescens</i> , M.Martens & Galeotti.	S3

---

### 7.5 Relación planta-hongo-ambiente

Se realizó un análisis de correspondencia canónica (CCA) para conocer la relación entre las variables abióticas, las especies vegetales y los grupos de hongos micorrizógenos arbusculares (Fig. 10). No se observó una correlación significativa ( $p > 0.05$ ) que justificará el ordenamiento



de los seis grupos obtenidos, lo cual puede explicarse por la variabilidad de condiciones ambientales y edáficas. La complejidad de la composición vegetal presente en el bosque de *Abies religiosa* no está relacionada con los patrones en las comunidades de HMA. Se encontró una relación de la composición de las plantas con las variables ambientales y edáficas. Algunas especies de plantas dentro del cuadrante I como *Baccharis conferta* y *Brassica campestris*, muestran preferencia por suelos dentro del bosque templado con un mayor pH y una baja concentración de nitrógeno total (Nt) y materia orgánica (MO %), en comparación con especies de plantas presentes en el cuadrante III como *Dichondra sericea*, *Avena fatua* y *Partenium hysterophorus*, que prefieren sitios con mayores contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y pH menor en el suelo. De manera que los cambios de la temporalidad dentro de este ecosistema tienen un impacto en la presencia de las especies vegetales presentes.

Algunas de las especies de plantas se separaron de acuerdo a la temporalidad, aquellas presentes en temporada lluviosa se ven condicionadas a la existencia de una mayor humedad relativa, menor temperatura y mayor contenido de nitrógeno total, materia orgánica en el suelo, un pH más ácido y con relación a la orientación se presentan en el sur-sureste, mientras que las especies de la temporada de secas están sometidas a una mayor cantidad de luz, temperatura, un dosel más abierto, un valor de pH menos ácido y tienden a encontrarse hacia el norte-noreste.



**Figura 9.** Análisis de correspondencia canónica (CCA). Los grupos de HMA se ilustran en triángulos con sus colores correspondientes. Rojo= grupo 1, Verde= grupo 2, Color turquesa= grupo 3, Color rosa= grupo 4, Azul = grupo 5, Color naranja= grupo 6. Donde T= temperatura, L= luz, Dosel= apertura del dosel, Pend= pendiente, MO %= porcentaje de materia orgánica, HRS %= porcentaje de humedad relativa, Nt= nitrógeno total, P= fósforo

## 8. Discusión

La producción de esporas de los hongos micorrizógenos arbusculares es influenciada por factores que varían a lo largo del gradiente altitudinal, modificando la diversidad, la riqueza y la composición de estos hongos (Davison *et al.*, 2015; Egan, 2017). En los bosques templados factores abióticos como las propiedades edáficas y del clima cambian a lo largo del gradiente altitudinal, y modulan la composición y estructura de la comunidad de HMA en el suelo (Řezáčová *et al.*, 2016, Aguilar-Trigueros *et al.*, 2019 ). La formación de grupos de HMA a través del clúster de dos vías agrupó a diferentes especies de HMA de acuerdo con su presencia por sitios y temporadas, lo que dio como resultado seis grupos que tienen patrones similares en su distribución espacio- temporal, los grupos generados a partir de este análisis se emplearon para investigar la relación con las variables ambientales. No obstante, en este trabajo no se encontró un efecto de los factores abióticos sobre la comunidad de HMA. Esto puede deberse a la cercanía de los sitios o incluso a una cuestión metodológica.

La altitud mostro un efecto contrario a lo reportado por Gai *et al.* (2012), quienes reportaron una menor riqueza taxonómica de HMA con el aumento de la altitud. Pese a que el gradiente altitudinal de este estudio se situaba entre los 3 100 y los 3 455 m s. n. m., que puede considerarse como una elevación alta dentro de los bosques templados, la altitud no fue una variable que influyera la riqueza de HMA en los tres sitios de estudio. Esto podría explicarse primero por el almacenamiento de las muestras de suelo que pudieron afectar la composición de HMA, ya que algunas esporas después de cierto tiempo empiezan a degradarse. La segunda explicación posible puede ser debida al efecto del tiempo de mantenimiento de cultivos trampa, que influye en la riqueza de especies de HMA, debido a que algunos géneros como *Scutellospora*, *Gigaspora*, *Acaulospora* y *Sclerocystis* requieren de más de tres meses para esporular, por lo que no se captura toda la diversidad de la comunidad de HMA presente en el suelo. Sin embargo, es una estimación de lo que se puede encontrar en el suelo de los sitios con distinta altitud muestreados. Como se observó en los resultados a pesar de emplear el método de cultivos trampa las especies de HMA no fueron las mismas en las diferentes altitudes, lo que podría sugerir que si se fomentó la esporulación de diferentes especies que estaban presentes en el momento de la recolecta.

En la misma zona de estudio se tienen como antecedentes los trabajos de Moreno-Unda (2008) quién reporto 10 especies de HMA para este bosque. Por otro lado, Vázquez-Santos (2016) reportó 28 especies. Para este trabajo se encontraron 24 morfoespecies de HMA, de las

cuales 18 se confirmaron a nivel de especie. Las diferencias encontradas en la composición y riqueza de HMA para el bosque de *Abies religiosa* de la CRM pueden explicarse por las diferencias en el patrón fenológico de esporulación de cada una de las especies de HMA, así como por la respuesta diferencial que pueden tener las plantas huésped ante cambios en los factores abióticos (humedad y temperatura).

El género *Acaulospora* fue el más frecuente para los tres estudios que se han realizado dentro del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena (Moreno-Unda, 2008; Vázquez-Santos, 2016; Peralta-Valencia, en proceso). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Polo-Marcial *et al.* (2021), quienes sugieren que este género es característico de zonas templadas de México con los datos registrados hasta el momento. Es importante mencionar que los suelos de bosques templados tienden a ser ligeramente ácidos, lo que limita la solubilidad, concentración y disponibilidad de algunos nutrientes, principalmente de fósforo (Hartemink y Barrow, 2023). Esta condición edáfica favorece la presencia del género *Acaulospora* el cual ha sido frecuentemente reportado en suelos con un pH ligeramente ácido (5.3 -6.3). De manera que, se ha sugerido que la principal función de este género es el transporte de fósforo a las plantas (Oehl *et al.*, 2010; Romero-Rangel *et al.*, 2015; Chávez-Hernández *et al.*, 2021). Por ejemplo, *Acaulospora alpina* se registró en un bosque de encino-pino en Chapa de Mota, Estado de México, y en un bosque de pino-encino en Taxco de Alarcón, Guerrero, en un intervalo de pH entre 4.6-5.4 en suelos de tipo Andosol y Luvisol respectivamente (Varela-Fregoso *et al.*, 2017; Trejo-Díaz y Tejero-Díez, 2017; Chávez-Hernández *et al.*, 2021). Así mismo, *Acaulospora mellea* se encontró en suelos con un pH de 4.4 (Wilson *et al.*, 1987). Dadas estas condiciones de pH ácido en el suelo donde el promedio para la temporada de secas es de 5.97, mientras que para la temporada de lluvias es de 5.94, y la disponibilidad de P limitada para las plantas, encontrando en promedio para la temporada de secas 5.35, mientras que en la temporada de lluvias fue de 6.01, lo que propicio la presencia de especies de hongos tolerantes a la acidez del suelo, como los pertenecientes al género *Acaulospora*.

Las especies generalistas de HMA tienen características propias de su fenología que favorecen su presencia, independientemente de los factores abióticos cambiantes (Öpik *et al.*, 2006). De acuerdo con Peralta-Valencia *et al.* (en proceso), la composición de HMA reportada en los trabajos de Moreno-Unda (2008) y Vázquez-Santos (2016), así como la encontrada al realizar experimentos en cultivos trampa mostraron que especies como *A. laevis*, *A. mellea* y *F. geosporus* toleran cambios en las condiciones edáficas a través del tiempo y del espacio, en

términos de su distribución geográfica. Esto sugiere que las especies generalistas podrían tener un uso potencial para la restauración en ecosistemas de bosque templado al emplearlas como inóculos nativos, sin embargo, es necesario contemplar dar seguimiento a lo que sucede en los bosques templados a través de estudios a largo plazo que permitan identificar con mayor precisión a especies de HMA con diferentes potenciales de uso, por ejemplo, aquellas especies que podrían exhibir comportamientos similares.

En este estudio, *Rhizophagus* fue el segundo género representativo con dos especies confirmadas y una por confirmar (*R. clarus*, *R. fasciculatus* y *Rhizophagus* sp. 1). Moreno-Unda (2008) no reportó ninguna especie de este género en suelos del bosque de *Abies religiosa*; mientras que Vázquez-Santos (2016) registró una especie confirmada y una especie por confirmar (*R. fasciculatus* y *R. aff. clarus*, respectivamente). Para el caso de *Rhizophagus clarus* aparece por primera vez reportada en este tipo de bosques, aunque de acuerdo con el trabajo de Polo-Marcial *et al.* (2021) ya había sido reportada para otros bosques de México.

Resulta interesante visualizar que el género *Glomus sensu stricto*, pese a ser considerado como generalista debido a su capacidad de encontrarse en diferentes condiciones ambientales y ser resistente a las perturbaciones del suelo (Opik *et al.*, 2006; Chagnon *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2014), estuvo poco representado en los sitios estudiados para este trabajo. Esto pudo deberse a que el género coloniza, principalmente, a través de las raíces de su hospedero por medio de hifas, las cuales no fueron el objetivo principal de este trabajo. Además de que las especies que componen al género *Glomus* pudieron no haber estado esporulando al momento en el que se procesaron las muestras mediante la implementación de cultivos trampa (Gazey *et al.*, 1992; Klironomos y Hart, 2002; Hart y Reader, 2004), pero si estar colonizando las raíces de su hospedante.

Los óptimos ambientales que pueden exhibir los diferentes géneros de HMA afectan sus rangos de distribución, pero en ecosistemas de montaña factores como la temperatura, la precipitación y el pH puede determinar la composición de las comunidades de HMA (Zhang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022). Se sabe que los cambios en la temperatura y la precipitación modifican de manera directa la cantidad de humedad en el suelo y de manera indirecta a la comunidad vegetal de la cual dependen los HMA para completar su ciclo de vida (Deveautour *et al.*, 2020). Dado que la esporulación de los HMA es sensible a los cambios de la humedad, la producción de esporas puede verse alterada por los cambios temporales del ecosistema. De manera similar, la variación en el pH del suelo afecta de manera directa a los nutrientes como

el fósforo, el nitrógeno y el carbono que aprovecha la comunidad vegetal y de la cual también depende la asociación micorrícica arbuscular (Gai *et al.*, 2004). No obstante el tiempo de almacenamiento fue un factor determinante en la composición de HMA, debido a que homogenizó las condiciones iniciales de las muestras de suelo, lo cual debe ser considerado. Lo anterior puede explicar porque en este trabajo no se encontró una correlación directa entre los factores abióticos con las condiciones de las macetas trampa.

En este trabajo la temporada seca se caracterizó por tener una temperatura promedio de  $12.44 \pm 0.44$  °C la cual fue mayor en comparación con la temporada de lluvias donde el promedio de temperatura fue de  $9.69 \pm 1.75$  °C. El porcentaje de humedad en la temporada seca fue significativamente más bajo ( $29.68 \pm 3$  %) que durante la temporada de lluvias ( $44.51 \pm 3.12$  %). Con relación a las condiciones abióticas de los sitios, se observó que el sitio 1, de mayor altitud presentó las temperaturas más bajas, así como suelos ligeramente más ácidos que favorecen la presencia de una mayor riqueza de HMA registrando 16 especies. Por otra parte, el sitio 3, de menor altitud, presentó las condiciones abióticas opuestas al sitio anterior, con los valores más altos para la temperatura y valores de pH ligeramente ácidos, siendo el sitio con la menor cantidad de especies de HMA (14 especies). Resulta interesante que, a pesar de las condiciones contrastantes de temperatura entre ambos sitios, compartieran la mayor cantidad de especies de HMA (10 especies). Lo anterior podría sugerir que las especies de HMA presentes son capaces de adaptarse a los cambios en las condiciones climáticas para poder esporular. Sin embargo, es necesario recordar que las muestras fueron almacenadas y sometidas a un cultivo trampa. Esto pudo ocasionar que las condiciones ambientales y la composición de HMA de los sitios estudiados no se reflejaran.

En este estudio la composición florística tuvo especies que de acuerdo con Hernández-Díaz (2022) son características de cada temporada. Las especies *Ageratina oreithales*, *Avena fatua*, *Baccharis pteronioides*, *Bidens anthemoides*, *Drymaria* sp., *Hackelia mexicana*, *Iresine diffusa*, *Lupinus glabratus*, *Parthenium hysterophorus*, fueron encontradas exclusivamente en la temporada de lluvias, mientras que *Arenaria lanuginosa*, *Baccharis conferta*, *Brassica campestris*, *Cerastium* sp., *Chimaphila umbellata*, *Galium* sp., *Garrya laurifolia*, *Phacelia platycarpa*, *Piqueria pilosa*, *Ribes ciliatum*, *Rubus liebmannii*, *Salix paradoxa*, *Salvia mexicana* y *Valeriana sorbifolia* fueron reportadas en la temporada de secas. La comunidad florística estuvo representada por 16 especies durante la temporada de lluvias y 20 especies durante la temporada de secas. En ambas temporadas el sitio 2 presentó un mayor número de

especies y de acuerdo con el análisis de CCA, debido a la asociación entre las plantas y los factores abióticos, se observó un incremento en los hospederos asociado a un mayor porcentaje de luz en la temporada lluviosa ( $18.27 \pm 0.94$ ) y un menor porcentaje de luz durante la temporada de secas ( $22.92 \pm 3.81$ ). La presencia de plantas hospedantes, y su distribución dada por factores abióticos influyó la presencia de HMA de manera indirecta.

La humedad en el suelo, la variación en los nutrientes, como el nitrógeno y la materia orgánica pudieron modificar la presencia de hospederos afectando de manera indirecta a la comunidad de HMA. El análisis de correspondencia canónica (CCA) no correlacionó los grupos de HMA con las variables ambientales ni la composición florística. Sin embargo, si se observó una correlación de las plantas con las variables edáficas. Esto pudo deberse a la metodología empleada para rescatar las esporas de HMA, que enmascaró el efecto de las variables *in situ* y favoreció la esporulación de otras especies que se encontraban en el suelo.

## 9. Conclusiones

La comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en el Bosque de la CRM estuvo representada por 24 especies de HMA. El género con mayor número de especies fue *Acaulospora*, seguido de *Rhizophagus*.

La composición de HMA no presentó una relación clara con la composición florística en un gradiente altitudinal del bosque de *Abies religiosa*. Tampoco fue posible establecer una relación significativa entre HMA, los factores abióticos y la composición vegetal. Es necesario realizar estudios en campo que permitan reforzar o refutar esta idea.

Se encontró una relación de la composición de las plantas con las variables ambientales y edáficas, en donde algunas especies se distribuían en los diferentes cuadrantes exhibiendo una preferencia por condiciones abióticas particulares.

Estos resultados resaltan la complejidad de las interacciones en este ecosistema y sugieren oportunidades futuras para investigaciones más

## 10. Perspectivas futuras

Los patrones de la vegetación y la presencia de los HMA pueden ser revelados si se realizan estudios que consideren solo la rizosfera próxima entre las plantas a estudiar para encontrar si existe una mayor abundancia o afinidad entre interactuantes.

## 11. Referencias

- Aguilera, P., Cumming J., Oehl, F., Cornejo, P., Borie, F. (2015). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in acidic soils and their contribution to aluminum phytotoxicity alleviation. In: Panda, S. K., F. Baluska (eds.), Aluminum stress adaptation in plants. Signaling and Communication in Plants. Springer, Cham. Pp. 203-228.
- Almeida -Leñero, L. A., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., de-Jesús-Ordoñez, M., Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta ecológica*, (84), 53-64.
- Álvarez-Sánchez, J., Monroy-Ata, A. (2008). Técnicas de estudio de las asociaciones micorrízicas y sus implicaciones en la restauración. SEMARNAT-CONACYT. Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F. 3,8, 232 pp.
- Bates, R.G. (1964). Determination of pH: theory and practice. John Wiley, New York, NY, USA.
- Bittebiere, A. K., Vandenkoornhuyse, P., Maluenda, E., Gareil, A., Dheilly, A., Coudouel, S., ... & Mony, C. (2020). Past spatial structure of plant communities determines arbuscular mycorrhizal fungal community assembly. *Journal of Ecology*, 108(2), 546-560.
- Bonfim, J. A., Vasconcellos, R. L. F., Gumiere, T., Mescolotti, D. D. L. C., Oehl, F., Cardoso, E. J. B. N. (2016). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a Brazilian Atlantic Forest toposequence. *Microbial Ecology*, 71(1), 164-177.
- Bremner, J.M. (1965). Total nitrogen. En: Black, C.A. (eds.). Methods of soil analysis. vol. 2. American Society of Agricultural, USA. pp. 1149–1178.
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., Malajczuk, N. (1996). Working with mycorrhizas in forestry and agriculture (Vol. 32, p. 374). Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research.



- Carrenho, R., Trufem, S. F. B., Bononi, V. L. R., Silva, E. S. (2007). The effect of different soil properties on arbuscular mycorrhizal colonization of peanuts, sorghum, and maize. *Acta Bot Bras* 21(3):723–730.
- Carrino-Kyker, S. R., Kluber, L. A., Petersen, S. M., Coyle, K. P., Hewins, C. R., DeForest, J. L., Smemo, K. A., Burke, D. J. (2016). Mycorrhizal fungal communities respond to experimental elevation of soil pH and P availability in temperate hardwood forests. *FEMS Microbiol Ecol* 92:024. DOI <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw024>
- Chagnon, P. L., Bradley, R. L., Maherali, H., Klironomos, J. N. (2013). A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in plant science*, 18(9), 484-491.
- Chávez-Hernández, C. G., Barrera Aguilar, C. C., Téllez Espinosa, G. J., Chimal-Sánchez, E., García-Sánchez, R. (2021). Colonización micorrízica y comunidades de hongos micorrizógenos arbusculares en plantas medicinales del bosque templado “Agua Escondida”, Taxco, Guerrero, México. *Scientia fungorum*, 51.
- CONABIO. (2019). Ecosistemas de México- Bosques Nublados. Recuperado el 28 de enero de 2019 de <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueNublado>.
- Davison, J., García de León, D., Zobel, M., Moora, M., Bueno, C. G., Barceló, M., ... Öpik, M. (2020). Plant functional groups associate with distinct arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytologist*, 226(4), 1117-1128.
- Davison, J., Moora, M., Öpik, M., Adholeya, A., Ainsaar, L., Bâ, A., Burla, S., Diedhiou, A. G., Hiiesalu, I., Jairus, T., Johnson, N. C., Kane, A., Koorem, K., Kochar, M., Ndiaye, C., Pärtel, M., Reier, Ü., Saks, Ü., Singh, R., Vasar, M. y Zobel, M. (2015). Global assessment of arbuscular mycorrhizal fungus diversity reveals very low endemism. *Science*, 349(6251): 970-973.
- Davison, J., Moora, M., Semchenko, M., Adenan, S. B., Ahmed, T., Akhmetzhanova, A. A., ... Öpik, M. (2021). Temperature and pH define the realized niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 231(2), 763-776.

- Delgadillo-Durán, E. (2011). "Productividad primaria neta de los bosques templados de la cuenca del río Magdalena". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/73619>
- Dumbrell, A. J., Ashton, P. D., Aziz, N., Feng, G., Nelson, M., Dytham, C., ... Helgason, T. (2011). Distinct seasonal assemblages of arbuscular mycorrhizal fungi revealed by massively parallel pyrosequencing. *New Phytologist*, 190(3), 794-804.
- Dumbrell, A.J., Nelson, M., Helgason, T., Dytham, C. y Fitter, A.H. (2010). Relative roles of niche and neutral processes in structuring a soil microbial community. *ISME Journal* 4: 337–345. *Ecology Letters* 7: 740–754.
- Egan, C. P. (2017). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi along an altitudinal gradient. Tesis de doctorado en filosofía. The University of British Columbia.
- Egerton-Warburton, L. M., Johnson, N. C., Allen, E. B. (2007). Mycorrhizal community dynamics following nitrogen fertilization: a cross-site test in five grasslands. *Ecological monographs*, 77(4), 527-544.
- Egerton-Warburton, L.M., Allen, E.B. (2000). Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient. *Ecological Applications*. 10, 484–496
- Facio-López, D J. (2015). "La relación carbono-nitrógeno en el mantillo y suelo del bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del Río Magdalena, D.F., México". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/39135>.
- FAO. (2023). Suelos ácidos. Disponible en: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>.
- Fellbaum, C. R., Gachomo, E. W., Beesetty, Y., Choudhari, S., Strahan, G. D., Pfeffer, P. E., ... Bücking, H. (2012). Carbon availability triggers fungal nitrogen uptake and transport in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(7), 2666-2671.

- Finlay, R. D. (2008). Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of experimental botany*, 59(5), 1115-1126.
- Fisher, P.J., O. Petrini, Lazpin, S.H.M. (1992). The distribution of some fungal and bacterial endophytes in maize (*Zea mays* L.). *New Phytologist*, 122, 299–305.
- Gai, J. P., Feng, G., Li, X. L. (2004). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field soils from North China. *Biodiversity Science*. 12, 435–440.
- Gai, J. P., Tian, H., Yang, F. Y., Christie, P., Li, X. L., Klironomos, J. N. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungal diversity along a Tibetan elevation gradient. *Pedobiologia*, 55(3), 145-151.
- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., Corona-Romero, N. (2013). Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y bosques*, 19(1), 53-69.
- Galicia, L., Chávez, B., Kolb, M., Jasso, R., Rodríguez, L., Solís, L., Guerra de la Cruz, V., Pérez, E., Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y bosques*. DOI: 10.21829/myb.2018.2421443.
- Galicia, L., García-Romero A., Gómez-Mendoza L., Ramírez, M. I. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *CIENCIA (Academia Mexicana de Ciencias)*, 58 (4): 50-59.
- Gange, A. C. (1993). Translocation of mycorrhizal fungi by earthworms during early succession. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(8), 1021-1026.
- Gerz, M., Bueno, C. G., Zobel, M., Moora, M. (2016). Plant community mycorrhization in temperate forests and grasslands: relations with edaphic properties and plant diversity. *Journal of Vegetation Science* 27:89–99 DOI 10.1111/jvs.12338.

- Grümber, B., Conforto, C., Rovea, A., Boxler, M., March, G., Luna, C., Meriles, J., Vargas, G. S. (2010). La glomalina y su relación con la productividad del cultivo del maíz. *Agronómicas* 47: 23.
- Gui, H., Hyde, K., Xu, J., Mortimer, P. (2017). Arbuscular mycorrhiza enhance the rate of litter decomposition while inhibiting soil microbial community development. *Scientific reports*, 7(1), 1-11.
- Guo Y., Ren C., Yi J., Doughty, R., Zhao F. (2020). Contrasting responses of Rhizosphere Bacteria, Fungi and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Along an Elevational Gradient in a Temperate Montane Forest of China. *Front. Microbiol.* 11:2042. DOI 10.3389/fmicb.2020.02042
- Gutiérrez, F. L. O. (1997). Evaluación de la calidad del dato analítico. I., 63-72 pp. Osorio, W. Diagnostico Químico de la Fertilidad de Suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín.
- Hart, M. M., Reader, R. J. Klironomos, J. N. (2001). Life-history strategies of arbuscular mycorrhizal fungi in relation to their successional dynamics. *Mycologia* 93: 1186–1194.
- Hartemink, A. E., Barrow, N. J. (2023). Soil pH-nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 1-7.
- Hausmann, N. T., Hawkes, C. V. (2010). Order of plant host establishment alters the composition of arbuscular mycorrhizal communities. *Ecology*, 91(8), 2333-2343.
- Hawkins, H. J., Johansen, A., George, E. (2000). Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 226(2), 275-285.
- Husband, R., Herre, E. A., Young, J. P. W. (2002). Temporal variation in the arbuscular mycorrhizal communities colonising seedlings in a tropical forest. *FEMS Microbiology Ecology*, 42(1), 131-136
- INTAGRI. (2017). Clasificación del Suelo: WRB y Soil Taxonomy. Serie Suelos. Núm. 28. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

- INVAM. (2022). Species diversity. The International Collection of Arbuscular (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi. The University of Kansas. Recuperado de: <https://invam.ku.edu/species-diversity>
- Jackson, M.L. (1982). Análisis químicos de suelos. Ediciones Omega S.A., Barcelona España. pp. 190-232.
- Jakobsen, I., Rosendahl, L. (1990). Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants. *New Phytologist*, 115(1), 77-83.
- Johnson, N.C., Graham, J.H. & Smith, F.A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism–parasitism continuum. *New Phytologist*, 135: 575–585.
- Koide, R. T., Kabir, Z. (2000). Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. *New Phytologist*, 148(3), 511-517.
- Koske, R. E. (1988). Vesicular-arbuscular mycorrhizae of some Hawaiian dune plants. *Pacific Science*, 42: 217– 229
- Landis, F. C., Gargas, A., Givnish, T. J. (2004). Relationships among arbuscular mycorrhizal fungi, vascular plants and environmental conditions in oak savannas. *New Phytologist*, 164(3), 493-504.
- Lekberg, Y., Gibbons, S. M., Rosendahl, S. Ramsey, P. W. (2013). Severe plant invasions can increase mycorrhizal fungal abundance and diversity. *ISME Journal* 7: 1424–1433.
- Lekberg, Y., Koide, R. T. (2005). Is plant performance limited by abundance of arbuscular mycorrhizal fungi? A meta-analysis of studies published between 1998 and 2003. *New Phytol* 168: 189–204.
- Lekberg, Y., Meadow, J., Rohr, J. R., Redecker, D., Zabinski, C. A. (2011). Importance of dispersal and thermal environment for mycorrhizal communities: lessons from Yellowstone National Park. *Ecology*, 92(6), 1292-1302.

- Linderman, R. G. (2000). Effects of Mycorrhizas on Plant Tolerance to Diseases: Mycorrhiza-disease interactions. *Arbuscular mycorrhizas: Physiology and function*, 345-365.
- Liu, Z., Fang, J., Song, B., Yang, Y., Yu, Z., Hu, J., ... Adams, J. M. (2022). Stochastic processes dominate soil arbuscular mycorrhizal fungal community assembly along an elevation gradient in central Japan. *Science of The Total Environment*, 158941.
- Looby, C. I., Maltz, M. R., y Treseder, K. K. (2016). Belowground responses to elevation in a changing cloud forest. *Ecology and evolution*, 6(7), 1996-2009.
- Lugo, M. A., Ferrero, M., Menoyo, E., Estévez, M. C., Siñeriz, F., y Antón, A. (2007). Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizospheric bacteria diversity along an altitudinal gradient in South American Puna grassland. *Microbial ecology*, 55(4), 705-713.
- Maia, L. C., Silva, G. A., Yano-Melo, A. M., Goto, B. T. (2010). Fungos micorrízicos arbusculares no Bioma Caatinga In Siqueira JO, de Souza FA, Cardoso EJB, Tsai SM (eds) *Micorrizas: 30 años de pesquisas no Brasil*. UFLA, Lavras, pp 279–310
- Meadow, J. F. Zabinski, C. A. (2012). Linking symbiont community structures in a model arbuscular mycorrhizal system. *New Phytologist* 194: 800–809.
- Monson, R. K. (2014). Ecology of temperate forest. En *Ecology and Environment*, pp 273-296, New York: Springer.
- Morales-Rojas, D. (2015). “Índices de calidad ecológica para evaluar los procesos a nivel de ecosistema en la cuenca del Río Magdalena, D. F., México” (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=direct&current\\_base=TES01&doc\\_number=000729382](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=direct&current_base=TES01&doc_number=000729382)
- Moreira-Souza, M., Trufem, S. F., Gomes-da-Costa, S. M., Cardoso, E. J. (2003). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. *Mycorrhiza*, 13, 211-215.

- Mosse, B., & Phillips, J. M. (1971). The influence of phosphate and other nutrients on the development of vesicular-arbuscular mycorrhiza in culture. *Microbiology*, 69(2), 157-166.
- Mota-Villanueva, E. (2022). Estudio de caso de integración horizontal: sociedad de productores forestales ejidales de Quintana Roo, S. C. Academia Edu. Disponible en: [https://www.academia.edu/11417679/Estudio\\_de\\_Caso\\_de\\_Integraci%C3%B3n\\_Horizonta\\_l\\_Sociedad\\_de\\_Productores\\_Forestales\\_Ejidales\\_de\\_Quintana\\_Roo\\_S\\_C](https://www.academia.edu/11417679/Estudio_de_Caso_de_Integraci%C3%B3n_Horizonta_l_Sociedad_de_Productores_Forestales_Ejidales_de_Quintana_Roo_S_C)
- Muscolo, A., Bagnato, S., Sidari, M., Mercurio, R. (2014). A review of the roles of forest. *Journal of Forestry Research*, 25(4), 725-736.
- Nava López, Mariana Zareth. (2003). "Los bosques de la cuenca alta del Rio Magdalena, D.F., Mexico: un estudio de vegetacion y fitodiversidad". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/343966>
- Neuenkamp L, Zobel M, Koorem K, Jairus T, Davison J, Öpik M, Vasar M, Moora M. (2021) . Light availability and light demand of plants shape the arbuscular mycorrhizal fungal communities in their roots. *Ecology Letters* 24: 426–437.
- Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., van der heiden, M., Sievering, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(5),724-738.
- Olivera-Morales, D., Castillo-Argüero, S., Guadarrama, P., Ramos-Zapata, J., Álvarez-Sánchez, J., Hernández-Cuevas, L. (2011). Establecimiento de plántulas de *Quercus rugosa* Née inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares en un bosque templado de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (89), 115-121.
- Olsson, P. A., Thingstrup, I., Jakobsen, I., y Baath, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil biology and biochemistry* 31: 1879-1887.

- Ong, K. H., Chubo, J. K., King, J. H., Le, C. S., Su, D. S. A., Sipeh, P. (2012). Influence of soil chemical properties on relative abundance of arbuscular mycorrhiza in forested soils in Malaysia. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36: 451- 458.
- Opik, M., Mora, M., Lira, J., Zobel, M. (2006). Composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. *Journal of Ecology*, 94(4):778-790.
- Ovalles, F. A., Collins, M. E. (1986). Soil-landscape relationships and soil variability in north central Florida. *Soil Science Society of America Journal*, 50(2), 401-408.
- Pereira, C. M. R., da Silva, D. K. A., de Almeida Ferreira, A. C., Goto, B. T., Maia, L. C. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Atlantic Forest areas under different land uses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 245-252.
- Pérez, A., Cury, K., Oviedo, L. (2016). Colonización de micorrizas arbusculares en tres especies de pasturas del departamento de Sucre. *Temas Agrarios*, 21 (2): 65-75.
- Polo-Marcial, M. H., Lara-Pérez, L. A., Goto, B. T., Margarito-Vista, X., y Andrade-Torres, A. (2022). Glomeromycota in Mexico, a country with very high richness. *Sydowia*, 74.
- Postma, J. W. M., Olsson, P. A., Falkengren-Grerup, U., (2007). Root colonisation by arbuscular mycorrhizal, fine endophytic and dark septate fungi across a pH gradient in acid beech forests. *Soil Biol. Biochem.* 39, 400–408.
- Powell, J. R., Rilling, M. C. (2018). Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. *New phytologist* 220: 1059-1075.
- Ramírez, M. E., Limas, E. A., Ortiz, P. R., Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de geografía*, (53-54), 77-88.
- Ramírez-Gómez, M., Pérez-Moncada, U., Serralde-Ordoñez, D., Peñaranda-Rolón, A., Roveda-Hoyos, G., Rodríguez, A. (2019). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi



- communities associated with cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) crops. *Agronomía Colombiana*, 37(3), 239-254.
- Ramírez-Trejo, M. D. R., Pérez-García, B., Orozco-Segovia, A. (2004). Analysis of fern spore banks from the soil of three vegetation types in the central region of Mexico. *American Journal of Botany*, 91(5), 682-688.
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H. et al. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23, 515–531 <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology letters*, 7(8), 740-754.
- Rillig, M. C., Ryo, M., Lehmann, A., Aguilar-Trigueros, C. A., Buchert, S., Wulf, A., ... Yang, G. (2019). The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity. *Science*, 366(6467), 886-890.
- Ruiz, O. (1997). Evaluación de la calidad del dato analítico. II. 73-84 pp. Osorio W. Diagnostico Químico de la Fertilidad de Suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín.
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta botánica mexicana*, (14), 3-21.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Edición Digital. Ciudad de México: Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- 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.R
- Sánchez, O., Vega, E., Peters, E., Monroy, V. O. (2003). Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. México: Instituto Nacional de Ecología.

- Santibáñez-Andrade, G. (2015). "Estado de conservación de la cuenca del río Magdalena: una evaluación a través de indicadores". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/61419>
- Schüßler A, Walker C. (2010). The Glomeromycota, a species list with new families and new genera. The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University. [www.amf-phylogeny.com](http://www.amf-phylogeny.com).
- SEMARNAT. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. SEMARNAT. México. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>.
- Silva, L.X., Figueiredo, M.V. B, Silva, G. A., Goto, B.T., Oliveira, J.P., Burity, H. A. (2008). Fungos micorrízicos Arbusculares em áreas de plantio de leucena e sabiá no estado de Pernambuco. *Rev Árv* 31:427–435
- Smith, S. E., y Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- Spatafora, J. W., Chang, Y., Benny, G. L., Lazarus, K., Smith, M. E., Berbee, M. L., ... & Stajich, J. E. (2016). A phylum level phylogenetic classification of zigomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia* 108(5): 1028-1046.
- Teixeira-Rios, T., da Silva, D. K. A., Goto, B. T., y Yano-Melo, A. M. (2018). Seasonal differences in arbuscular mycorrhizal fungal communities in two woody species dominating semiarid caatinga forests. *Folia Geobotanica*, 53(2), 191-200
- Toju, H., Sato, H., Yamamoto, S., Tanabe, A. S. (2018). Structural diversity across arbuscular mycorrhizal, ectomycorrhizal, and endophytic plant–fungus networks. *BMC plant biology*, 18, 1-12.
- Tovar-Bustamante, E. G. (2017). "Estructura y composición de la comunidad de macromicetos del bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del Río Magdalena, Cd. Mx. México". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/311423>

- Trejo-Díaz, C. C., Tejero-Díez, J. D. (2017). Flora de plantas vasculares en la Sierra de las Ánimas, Chapa de Mota, Estado de México, México. *Polibotánica*, (43), 1-35.
- Van der Heijden, M., Klironomos, J., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A., Sanders, I., (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396, 69–72.
- Van Geel, M., Jacquemyn, H., Plue, J., Saar, L., Kasari, L., Peeters, G., ... Ceulemans, T. (2018). Abiotic rather than biotic filtering shapes the arbuscular mycorrhizal fungal communities of European seminatural grasslands. *New Phytologist*, 220(4), 1262-1272.
- Varela-Fregoso, L., Mora-Velázquez, A., Chávez-Hernández, C. G., Martínez-Bernal, A., García-Sánchez, R., Chimal-Sánchez, E., Montaña, N. M. (2017). *Acaulospora alpina* y *Ambispora fennica*, dos registros nuevos de hongos micorrizógenos arbusculares para México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(3), 496-501.
- Vázquez-Santos, Yasmín. (2016). "Los hongos micorrizógenos arbusculares en la fenología reproductiva de *Acaena elongata* l. del bosque de *Abies religiosa* en la cuenca del Río Magdalena, Cd. Mx., México". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/330910>
- Vázquez-Santos, Y., Martínez-Orea, Y., Álvarez-Sánchez, J., Montaña, N. M., Camargo-Ricalde, S. L., Castillo-Argüero, S. (2021). Interaction of *Acaena elongata* L. with arbuscular mycorrhizal fungi under phosphorus limitation conditions in a temperate forest. *Phyton International Journal of Experimental Botany*, 90(2), 605.
- Velázquez, M. S., Fabisik, J. C., Barrera, M., Allegrucci, N., Valdés, F. E., Abarca, C. L., Cabello, M. (2020). Diversidad y abundancia de hongos micorrizicos arbusculares (Glomeromycota) asociados con *Ilex paraguarensis* en el noreste de Argentina. *Revista de Biología Tropical*, 68(4), 1231-1241.
- Vieira, L. C., da-Silva, D. K., da-Silva, I. R., Gonçalves, C. M., de Assis, D. M., Oehl, F., da-Silva, G. A. (2019). Ecological aspects of arbuscular mycorrhizal fungal communities in

- different habitat types of a Brazilian mountainous area. *Ecological Research*, 34(1), 182-192.
- Violi, H. A., Barrientos-Priego, A. F., Wright, S. F., Escamilla-Prado, E., Morton, J. B., Menge, J. A., Lovatt, C. J. (2008). Disturbance changes arbuscular mycorrhizal fungal phenology and soil glomalin concentrations but not fungal spore composition in montane rainforests in Veracruz and Chiapas, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 254(2), 276-290.
- Waldrop, M. P., Zak, D. R., Blackwood, C. B., Curtis, C. D., Tilman, D. (2006). Resource availability controls fungal diversity across a plant diversity gradient. *Ecology Letters* 9:1127–1135 DOI 10.1111/j.1461-0248.2006.00965.x
- Walkley, A.I., Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 34: 29–38.
- Wang, B., y Qiu, Y. L. (2006). Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 16(5), 299-363.
- Wilson, D.O. (1987). Differential plant response to inoculation with tow VA mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 110: 69-75.
- Zhang, M., Yang, M., Shi, Z., Gao, J., Wang, X. (2022). Biodiversity and Variations of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Roots along Elevations in Mt. Taibai of China. *Diversity*, 14(8), 626.
- Zobel, M., Öpik, M. (2014). Plant and arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities— which drives which? *Journal of Vegetation Science*, 25(5), 1133-1140.
- Zou, G., Liu, Y., Kong, F., Liao, L., Deng, G., Jiang, X., Cai, J., Liu, W. (2021). Depression of the soil arbuscular mycorrhizal fungal community by the canopy gaps in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation on Lushan Mountain, subtropical China. *PeerJ* 9: e10905 DOI <http://doi.org/10.7717/peerj.10905>

## 11. Anexo

### Anexo 1 Método de Brundrett *et al.*, 1966

#### PVLG

1.66 g alcohol polivinílico (20-25 viscosidad en solución acuosa al 4 %)

10 ml de agua

10 ml de ácido láctico

1 ml de glicerina

En un frasco de vidrio ámbar, colocar en 10 ml de agua el alcohol polivinílico y poner a baño maría por 6 horas a 80 ° C. Después de ese tiempo o cuando se haya disuelto el alcohol, agregar el ácido láctico y la glicerina, revolver. Dejar reposar 24 h antes de usarse. En lugar de baño maría puede usar autoclave a 15 lb de presión por 15 minutos.

### Anexo 2. Método de Koske y Tessier (1983)

#### Reactivo de Melzer

100 ml de agua destilada

1.5 g de yodo

5 g de yoduro de potasio

En un recipiente se revuelven todos los ingredientes. Posterior a ello se hace una dilución 1:1 con PVLG.