



Caracterización morfológica de las poblaciones de hongos formadores de micorrizas
arbusculares nativas asociadas a fincas ganaderas y zona de bosque en suelos de Caño Cristales
de la Macarena Meta

Autor

Hernán Figueroa Romero.

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Regional Orinoquia

Sede Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

octubre de 2023

Caracterización morfológica de las poblaciones de hongos formadores de micorrizas
arbusculares nativas asociadas a fincas ganaderas y zona de bosque en suelos de Caño Cristales
de la Macarena Meta

Autor

Hernán Figueroa Romero.

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Agroecológico

Asesor(a)

Martha Lucia Velasco Belalcázar

Bióloga

MSc Fitopatología

Co Asesor (a)

Carlos Alberto Hernández Medina

Biólogo

MSc Fitopatología

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Regional Orinoquia

Sede Villavicencio (Meta)

Programa Ingeniería Agroecológica

octubre de 2023

Dedicatoria

Quiero expresar mi gratitud en este trabajo, comenzando por reconocer la importancia de mi fe, que me proporcionó la fortaleza y sabiduría necesarias para enfrentar mi proceso de formación con dedicación y responsabilidad.

También deseo agradecer a mis seres queridos, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para impulsarme a emprender y completar con éxito esta investigación, que representa la culminación de una de mis metas más significativas: obtener el título de Ingeniero Agroecológico. Además, no puedo pasar por alto la influencia positiva de todas las personas que, de diversas maneras, contribuyeron emocional y profesionalmente a lo largo de esta desafiante etapa. Mi pareja, amigos, compañeros, maestros y mi familia fueron fuentes de inspiración y guía en este viaje de aprendizaje y crecimiento. A todos ustedes, les agradezco sinceramente por haber sido parte esencial de mi trayecto.

Agradecimientos

En un primer plano, deseo expresar mi reconocimiento a Dios por haberme brindado la capacidad de emprender esta nueva fase en mi vida y por haber sido una fuente constante de apoyo y guía. Asimismo, extiendo un reconocimiento especial a mi asesora y coasesor de proyecto, Martha Lucia Velasco Belalcázar y Carlos Alberto Hernández Medina. Su inestimable contribución ha sido esencial para el éxito de este proyecto, proporcionando orientación, colaboración profesional y apoyo emocional. Su guía, paciencia y motivación han tenido un impacto significativo en mi formación como investigador y profesional.

Además, quiero agradecer a mi familia, compañeros y amigos por su inquebrantable apoyo y colaboración a lo largo de todo el proceso. A mis docentes, les reconozco por su dedicación y compromiso en la transmisión de conocimientos que han enriquecido tanto mi formación personal como profesional.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi compañero Herly Fabián Sánchez Méndez, cuya valiosa contribución hizo posible la exitosa toma de muestras de campo y su posterior envío a la ciudad de Villavicencio. Su colaboración fue fundamental para llevar a cabo este importante proceso de manera eficiente y efectiva. Estoy profundamente agradecido por su compromiso y dedicación, sin los cuales no habríamos logrado este logro.

Por último, pero no menos importante, expresar mi agradecimiento a la Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO) por brindar la oportunidad de llevar a cabo proyectos de investigación y por ofrecer diversos semilleros de investigación en nuestro programa académico, lo que ha contribuido significativamente a nuestro desarrollo académico y profesional.

Contenido

Lista de tablas	7
Lista de figuras.....	8
Lista de anexos.....	11
Resumen.....	12
Abstract.....	13
Introducción	14
CAPÍTULO I	13
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.1.1 Objetivo específico	16
CAPÍTULO II	17
2 Problemática	17
2.1.1 Antecedentes	19
2.1.2 Estado actual del problema	23
2.1.3 Preguntas problema.....	25
3 Capitulo III.....	26
3.1 Justificación	26
4 Capitulo IV.....	28
4.1 Marco teórico.....	28
4.1.1 La rizosfera	28
4.1.2 ¿Qué son las micorrizas arbusculares?.....	29
5 Capítulo V.....	35
5.1 Materiales y métodos	35
5.1.1 Área de estudio	35
5.1.2 Toma de muestras en campo.....	36
5.1.3 Extracción e identificación de esporas de Hongos formadores de micorrizas arbusculares-HMA	37
5.2 Determinación de la abundancia de los Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) en los sitios de muestreo y su relación con el pH	40

5.2.1	Conteo de número de esporas presentes en las muestras de suelo de cada sitio de muestreo.....	40
5.2.2	Medición del pH en las muestras de suelo	40
5.2.3	Diseño experimental y análisis estadístico.....	41
6	Capítulo VI.....	43
6.1	Resultados y discusión.....	43
6.1.1	Cuantificación de la densidad de esporas de HMA de suelo rizosférico	43
6.1.2	Géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares nativos encontrados en las zonas de estudio de la Macarena- Meta	49
6.1.3	Relación del pH del suelo en la abundancia de los Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA).....	54
7	Capítulo VII	57
7.1	Conclusiones.....	57
8		58
9	Capítulo VIII.....	59
9.1	Referencias.....	59

Lista de tablas

Tabla 1. Georreferenciación de las áreas o sitios de estudio seleccionados para la toma de muestras: Coordenadas, metros sobre el nivel del mar, pH promedio del suelo en cada sitio y Resultados del número promedio de esporas recolectadas en 100gr de suelo por cada muestra. Autor (2023)..	44
Tabla 2. Especies/morfoespecies encontradas en las zonas de Bosque y potrero o pastizal del Municipio de la Macarena -Meta. Clasificación taxonómica e información de la figura en la que se representa la espora de la morfoespecie identificada. Autor. (2023).....	50

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de los diferentes tipos de colonización producidos por los hongos micorrízicos. Tomado de Cruz Higareda (2014).....	34
Figura 2. Ubicación de las áreas seleccionadas para la toma de muestras de suelo rizosférico necesarias para el desarrollo de la investigación. Los puntos están marcados como Sitio BM1: Bosque- Muestra 1.; Sitio BM2: Bosque- Muestra 2.; Sitio BM3: Bosque- muestra 3.; Sitio PM1: Potrero- muestra 1.; Sitio PM2: Potrero- muestra 2.; Sitio PM3: Potrero- muestra 3. Autor (2023).....	35
Figura 3. Imágenes de proceso de toma de las muestras de suelo rizosférico en cada uno de los puntos de muestreo seleccionados en la zona de bosque y potrero. A, B) Sitio BM1: Bosque- Muestra 1., C, D) Sitio BM2: Bosque- Muestra 2., E, F) Sitio BM3: Bosque- muestra 3., G, H) Sitio PM1: Potrero- muestra 1., I, J) Sitio PM2: Potrero- muestra 2., K, L) Sitio PM3: Potrero- muestra 3. Autor (2023).....	37
Figura 4. Proceso de extracción de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares mediante la técnica de decantación y tamizado en humedo seguida de centrifugación en solución azucarada. (A-B): Tamizado humedo con 100 gr de suelo a travez de cuatro tamices consecutivos, C,D: rescate del material obtenido en los tamices de 106 y 38 μ m para su posterior empacado en tubos; (E, F) Uso de tubos falcon para el rescate de material resultante de los ultimos dos tamices y agregado de solución azucarada para posterior centrifugación (G,H) Proceso de centrifugado a 3500 revoluciones por 5 minutos. Autor (2023).	38
Figura 5. Proceso de clasificación e identificación de las esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares. (A, B, C) visualización al estereoscopio para la identificar y separación de esporas por tamaño, color y forma, (D) tubos eppendorf utilizados para el almacenamiento de esporas uno por cada forma encontrada “clasificados de 1 a 7 o más según el número de morfo especies encontrados en cada muestra. (E, F) placas semipermanentes rotuladas de acuerdo a la forma de cada espora separada en el paso anterior, (G, H) visualización al microscopio para su posterior conteo, seguimiento fotográfico e identificación Autor (2023).....	39

Figura 6. Proceso de medición de pH en las muestras del estudio. (A) pesaje de 20g de suelo rizosférico (B) 20g de suelo y medición de 50ml de agua destilada (C) homogenización de la solución agua y suelo en el agitador magnético por 15 minutos (D, E) Multiparámetro con pH-metro para medir el pH en cada una de las muestras obtenidas Autor (2023).....	41
Figura 7. Comparación del número promedio de esporas presentes en los suelos de bosque y pastizales en la Macarena-Meta. Los valores observados corresponden a número promedio de esporas en 100 g de suelo de las dos zonas seleccionadas, pastos y bosque en espacios de la Macarena Meta. Autor (2023).....	43
Figura 8. Resultado del número promedio de esporas por cada 100 g de suelo encontrados en cada uno de los sitios de muestreo de la zona de bosque (BM) y la zona de pastizal o ganadera (PM) que fueron parte de este estudio. Autor (2023).....	46
Figura 9. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas asociadas a ambas zonas de estudio: A) Acaulospora sp. 1 B) Acaulospora sp. 2, C) Acaulospora sp. 3, D) Acaulospora sp. 4, E) Acaulospora sp. 5, F) Gigaspora sp. 1, G) Gigaspora sp. 2, H) Claroideoglossum sp. 1, I)Claroideoglossum sp. 2, J) <i>Glomus</i> sp. 1, K) <i>Glomus</i> sp. 2, L) <i>Glomus</i> sp. 3, M) <i>Glomus</i> sp. 4, N) <i>Glomus</i> sp. 5, Ñ) <i>Glomus</i> sp. 6, O) <i>Glomus</i> sp. 7, P) <i>Glomus</i> sp. 8. Autor. (2023).	51
Figura 10. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas de manera exclusiva en zona de Bosque: A) cf Acaulospora scrobiculata, B) Acaulospora sp. 6, C) Acaulospora sp. 7, D) Acaulospora sp. 8, E) Acaulospora sp. 9, F) Acaulospora sp. 10, G) <i>Glomus</i> sp. 9, H) <i>Glomus</i> sp. 10, I) <i>Paraglomus</i> sp. 1, J) <i>Scutellospora</i> sp. Autor. (2023).	52
Figura 11. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas de manera exclusiva en zona de Pastizal o pradera: A) Acaulospora sp. 11, B) Acaulospora sp. 12, C) <i>Glomus</i> sp. 11, D) <i>Glomus</i> sp. 12, E) <i>Glomus</i> sp. 13, F) <i>Glomus</i> sp. 14, G) <i>Glomus</i> sp. 15, H) <i>Glomus</i> sp. 16, I) <i>Glomus</i> sp. 17. Autor. (2023).....	53
Figura 12. Resultado del índice de correlación de Pearson entre el número de esporas y el pH del suelo de los sitios de muestreo en la zona de bosque y pastizal. (Autor 2023).....	55

Lista de anexos

Anexo 1 Datos brutos del conteo de número de esporas y resultados de la medición de pH para cada muestra en los sitios de estudio. Autor (2023).....	64
--	----

Resumen

La biodiversidad de Colombia está disminuyendo a un ritmo acelerado debido a las actividades de deforestación a causa de la agricultura y la ganadería, dado que tienen un efecto en la comunidad de microorganismos presentes en el suelo, lo que a su vez repercute en el crecimiento de las especies vegetales. Es por ello, que la presente investigación pretendió realizar una caracterización morfológica de las poblaciones de hongos formadores de micorrizas arbusculares nativas en suelos de la región de la Macarena- Meta, para conocer la biodiversidad presente en este territorio y facilitar acciones de conservación. Para lo anterior, se estableció un diseño y muestreo de suelo completamente al azar en las dos zonas de estudio (Bosque y pastizal). De cada una se seleccionaron tres localidades (3 fincas ganaderas y 3 zonas de bosque) de las cuales obtuvieron un total de 6 muestras de suelo rizosférico. A cada muestra se le realizó 5 eventos de extracción de esporas mediante la técnica de decantación y tamizado húmedo seguida de centrifugación en solución azucarada al 70%. Con los datos obtenidos se realizaron análisis de medias, a través de la Prueba t-studens y se calculó el índice de correlación de Pearson. Se logró la extracción y recuento de 243.858 esporas de HMA en todo el estudio. Al comparar el bosque con el potrero, en términos de número promedio de esporas, se observó que el entorno boscoso (10,421.77 esporas/100 gr de suelo) presentan una considerable ($n=30$; p -valor: 0.000000000019209) abundancia de esporas en contraposición a las muestras tomadas en el potrero (5,835.467 esporas/100 gr de suelo). Por otro lado, se evidenció una correlación negativa (-0,63347) entre el número de esporas y el pH del suelo de los sitios de muestreo, es decir, con una probabilidad de $p=0,00017153$, se evidencia que, a mayor pH en el suelo, se encuentra una menor densidad o número de esporas de HMA presentes en estos. Las esporas encontradas correspondían a 36 morfotipos clasificadas taxonómicamente en tres órdenes (Diversisporales, Glomerales, Paraglomerales). De igual forma se encontró que el género *Glomus* presentó el mayor número de morfos con 17 formas diferentes, seguido de *Acaulospora* (13), *Gigaspora* (2), *Claroideoglomus* (2), *Paraglomus* y *Scutellospora* cada uno con una sola morfoespecie. Se pudo concluir que la alta riqueza y abundancia de esporas encontradas y extraídas en este estudio presentan un potencial enorme en la generación de bioinoculantes nativos que se pueden utilizar para el desarrollo de estrategias de conservación y mejora de la salud del suelo de la región de la Macarena.

Palabras clave: Biodiversidad, biorremediación, conservación, micorrizas, suelo.

Abstract

Colombia's biodiversity is decreasing at an accelerated rate due to deforestation activities due to agriculture and livestock, since they have an effect on the community of microorganisms present in the soil, which in turn affects the growth of plant species. For this reason, this research aimed to carry out a morphological characterization of the populations of native arbuscular mycorrhiza-forming fungi in soils of the Macarena-Meta region, to understand the biodiversity present in this territory and facilitate conservation actions. For the above, a completely random design and soil sampling was established in the two study areas (Forest and grassland). From each one, three locations were selected (3 livestock farms and 3 forest areas) from which a total of 6 rhizospheric soil samples were obtained. Each sample underwent 5 spore extraction events using the wet decanting and sieving technique followed by centrifugation in 70% sugar solution. With the data obtained, analysis of means was carried out through the t-studens test and the Pearson correlation index was calculated. The extraction and counting of 243,858 AMF spores was achieved throughout the study. When comparing the forest with the pasture, in terms of average number of spores, it was observed that the forest environment (10,421.77 spores/100 g of soil) present a considerable ($n=30$; p -value: 0.000000000019209) abundance of spores in contrast to the samples taken in the pasture (5,835,467 spores/100 g of soil). On the other hand, a negative correlation (-0.63347) was evident between the number of spores and the pH of the soil at the sampling sites, that is, with a probability of $p=0.00017153$, it is evident that the higher the pH In the soil, there is a lower density or number of AMF spores present in them. The spores found corresponded to 36 morphotypes classified taxonomically in three orders (Diversisporales, Glomerales, Paraglomerales). Likewise, it was found that the genus *Glomus* presented the greatest number of morphs with 17 different forms, followed by *Acaulospora* (13), *Gigaspora* (2), *Claroideoglomus* (2), *Paraglomus* and *Scutellospora* each with a single morphspecies. It was possible to conclude that the high richness and abundance of spores found and extracted in this study present enormous potential in the generation of native bioinoculants that can be used for the development of conservation strategies and improvement of soil health in the Macarena region.

Keywords: Biodiversity, bioremediation, conservation, mycorrhizae, soil.

Introducción

La biodiversidad de Colombia está disminuyendo a un ritmo acelerado debido a las actividades de deforestación a causa de la agricultura y la ganadería, consideradas la mayor acción sobre la pérdida de biodiversidad. Un ejemplo claro es la Orinoquia y Amazonia, puesto que se han visto afectadas por la presión demográfica y las actividades económicas. Pese a la aprobación del estado con el documento “*CONPES 4021 de 2020 una Política Nacional para el Control de la Deforestación y la Gestión Sostenible de los Bosques*” el diagnóstico indica que las figuras de conservación y protección que limitan el uso del suelo, aunque incide favorablemente, han sufrido procesos de pérdida de bosque que a su vez ponen en riesgo los servicios ecosistémicos (Forero y Polanco, 2021).

La razón de lo anterior, tanto la actividad ganadera como los sistemas de monocultivo tienen un efecto en la comunidad de microorganismos presentes en el suelo, lo que a su vez repercute en el crecimiento de las especies vegetales. Cuando hay una escasez de nutrientes en el suelo, las raíces de las plantas desempeñan un papel crucial al ser impulsadas por la presencia de micorrizas arbusculares. Estas micorrizas facilitan la mejor absorción y transporte de nutrientes, lo que aumenta la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas. En este sentido, conocer las características fisicoquímicas del suelo y su relación con la presencia de micorrizas tiene que ser la base para generar cultivos más productivos, ocasionando un menor impacto ambiental (Carrillo, *et al.*, 2022).

De todos modos, esta investigación buscó fortalecer y concientizar a la comunidad de la Macarena Meta, la importancia que tiene las micorrizas arbusculares y su amplio resultado en una agricultura y en sistema de ganadería. La literatura define micorriza como una asociación conformada por un conjunto de hifas fúngicas (micelio), aunque en otros casos la ectomicorriza o micorriza arbuscular penetran la raíz pero no genera un manto, por lo tanto, las hifas se ramifican

en el suelo conformando una extensa red que puede interconectar raíces de la misma planta o de algunas aledañas, esta red de micelio permite en ciertas condiciones, un libre flujo de nutrientes, hacia la planta hospedera y las raíces de las plantas que se encuentran en la gran conexión (Pérez *et al.*, 2019, Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022, Romero – Salazar *et al.*, 2022).

Así mismo, dentro de la diversidad de hongos se logra determinar que las micorrizas se encuentran distribuidas por todo el trópico, como lo es en la amazonia que se encuentra en un 80% de las plantas vasculares, “las ectomicorrizas se hallan entre el 17 y 31% de las plantas, el género *Glomus* tiene una dominancia en la composición micorrizica del Trapecio Amazónico (cerca del 50%), seguido de *Acaulospora* que se encuentra asociado a los suelos más ácidos y *Gigaspora* en suelos de zonas con pendientes entre otras encontradas en suelos cercanos (Hernández y Monroy, 2019).

Por último, pero no menos importante, se tiene en cuenta aspectos como el pH para evaluar si interfiere en el número de esporas por cada 100gr de suelo, el número de submuestras tenidas en cuenta para evaluar el índice de Pearson si es o no estadísticamente significativo, el estado comparativo entre pastizal área utilizada para ganadería y bosque que no está siendo intervenida.

CAPÍTULO I

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar la relación entre la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares y la variación de pH en suelos con diferente grado de intervención antrópica de la zona de Caño Cristales, departamento del Meta, que puedan generar una aproximación al impacto causado por el cambio del uso de suelo para la ganadería.

1.1.1 Objetivo específico

- Identificar los géneros y abundancia de hongos micorrícicos arbusculares autóctonos presentes en seis suelos de uso agropecuario/ganadería y bosque nativo de caño cristales en la región de la Macarena Meta.
- Analizar la influencia del pH del suelo sobre la riqueza y abundancia de los hongos formadores de micorrizas arbusculares en las áreas de investigación.

CAPÍTULO II

2 Problemática

Diversas especies vegetales de relevancia económica, como las forestales y muchas comestibles, encuentran su máximo potencial de crecimiento gracias a la simbiosis que establecen con los hongos formadores de micorrizas (Carrasco *et al.*, 2010). Un hecho de gran importancia, debido a la resiente problemática que se ha manifestado con las guerras entre Rusia y Ucrania, así como las que se presentan en países de oriente medio, lo que ha ocasionado escases y elevado costo de fertilizantes de síntesis química, necesarios para la producción de alimentos a nivel mundial. Lo anterior, ha generado el interés por conocer y explorar diversas fuentes que puedan suplir o minimizar los efectos de dicha problemática. En este contexto surgen los hongos formadores de micorrizas arbusculares, como una alternativa.

El entorno de investigación micorrícica es variado y se fundamenta en que los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA o HFMA) son un componente del ecosistema natural, que representa entre el 5 y 50% de la biomasa de los microorganismos del suelo, considerada una comunidad biológica muy diversa que es esencial para el incremento de sostenibilidad de los ecosistemas (Saldaña *et al.*, 2022). No obstante, esta relación al ser natural está presente en cualquier ámbito ya sea en la agricultura moderna o en espacios no explorados por el hombre.

En cuanto a su importancia, Saparrat *et al.*, (2020) afirma que los glomales son un grupo capaz de realizar una simbiosis con la raíz del 95% de las la plantas, haciendo que los HFMA sean relevantes dentro de la agricultura convencional por ser una herramienta de gran utilidad para la absorción y suministro de nutrientes a plantas, es decir, el uso equilibrado y eficiente del hongo

formador de micorriza optimiza el crecimiento de las plantas, y a su vez disminuye el uso inapropiado de insumos agrícolas, por lo tanto, el uso de (MA) en la agricultura tiene como ganancia, mayor absorción de elementos poco móviles como P, Cu y Zn; protección contra patógenos; mayor resistencia a la sequía; y contribución a la formación de la estructura del suelo (Alegre, *et al.*, 2019).

A pesar de que se conocen muchas de sus bondades para las plantas, el suelo y los microorganismos circundantes, se carece de información acerca de las poblaciones presentes en sitios de alta diversidad como lo es la zona de caño cristales en la Macarena Meta, por lo que se hace necesario realizar este tipo de investigaciones.

2.1.1 Antecedentes

Existe gran variedad de estudios relacionados a la formación de micorrizas, sus efectos y relación simbiótica, muchos informes relacionados buscan fortalecer, cuantificar y mantener un solo argumento frente al comportamiento presente, sin embargo, en contexto general (Cuenca *et al.*, 2007; Saparrat, Ruscitti y Arango, 2020; Carrillo *et al.*, 2022) afirman que; las micorrizas arbusculares (MA) son interacciones ecológicamente mutualistas, con una inmensa diversidad de plantas, siendo esto un efecto positivo para una agricultura sustentable donde se tiene en cuenta aspectos de nutrientes poco móviles o de fácil adsorción para la planta, protección contra patógenos, resistencia a la sequía además de contribuir a la formación de la estructura del suelo (Romero- Salazar *et al.*, 2022). Por otra parte, en otra investigación, se evaluaron las micorrizas en medio PDA de manera individual y mezcladas con *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp para medir crecimiento, donde se evidencia un aporte de estos, es decir; al utilizarse en medios de cultivos, se observa una estimulación del crecimiento y supresión de enfermedades (Sosa *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2020).

Por lo tanto, las micorrizas representan una asociación simbiótica entre una planta y un hongo, en la cual se produce un intercambio de nutrientes y el hongo establece una conexión con la planta para facilitar su acceso a dichos nutrientes. Estas asociaciones se encuentran naturalmente distribuidas en diversos suelos, presentando una amplia variedad de micorrizas. Cada tipo de micorriza tiene la capacidad de generar un mutualismo con la planta, especialmente en condiciones ambientales extremas para estas últimas. (Pérez *et al.*, 2011; Riopedre *et al.*, 2021; Bastida 2022).

Por otra parte, en el municipio de la Macarena departamento del Meta, ubicado geográficamente con una alta biodiversidad de plantas y animales, los bosque primario y zonas de laderas, se encuentran en constante conflicto por la alta demanda de deforestación en la zona, este cambio se debe a la expansión ganadera que se considera como uno medio de ingresos de los

habitantes, sin embargo, a lo largo de la historia, la Macarena ha sufrido del ciclo denominado colonización armado que es destacada por los cambios que ha tenido a lo largo de la historia (Peña, 2021).

En respuesta a la intervención en el sitio de estudio, Fierro (2020) sostiene que el uso de cobertura del suelo desempeña un papel crucial en el análisis, ya que puede ser detectado mediante diversas herramientas y proporciona al investigador una valiosa herramienta para la investigación cualitativa. Por lo tanto, la evaluación de la presencia de microorganismos permite evaluar cambios significativos. Según el mismo autor, *"cuando se lleva a cabo una extracción desproporcionada de recursos naturales a escala industrial en una zona, en lugar de actividades agrícolas o de protección del suelo, puede generarse un desequilibrio en el ecosistema debido a estos efectos"*.

Teniendo en cuenta lo anterior se decide evaluar la importancia de la micorriza en asociación con plantas en suelos de la Macarena Meta, evaluando diferentes zonas entre ellas zonas de ganadería y zona aledañas a bosque primario.

Por lo tanto; varios experimentos hechos en Colombia que fueron realizados con plantas *in vitro* en microclima, y el suelo no estéril, demuestran que la inoculación con los HFMA tiene efectos sobre el crecimiento de yuca, aunque puede variar de acuerdo a las características físicas del suelo y la zona donde se realice la prueba; en el caso de la yuca, esta interacción mejoró la productividad en 5t/ha esto demuestra una mayor profundización en estudio sobre la relación que tiene la micorriza y gran variedad de cultivos transitorios (Rojas, 2016; Sandoval & García 2019).

Cabe mencionar que, Colombia cuenta extensiones amplias en ganadería; algunos sistemas encaminados hacia la producción de carne y leche o doble propósito en sistemas silvopastoriles, rotacionales o a campo abierto que se evidencian más en la parte baja del país, no obstante, estos sistemas generan un desgaste en el suelo por el pisoteo diario, las heces y orina de los rumiantes,

así como también, afectan la actividad de los HMA, los cuales son destacados por su función ecológica con una gran incidencia en la estabilidad de ecosistemas donde las condiciones son de extremos desgastes (Restrepo *et al.*, 2019).

Basado en lo anterior, se puede definir que las micorrizas arbusculares tienen la capacidad de penetrar la raíz de la planta sin formar una capa protectora. Esta conexión natural permite un flujo eficiente de nutrientes hacia la planta. Es importante destacar que esta relación simbiótica no causa efectos negativos en el hospedero, sino que más bien representa un beneficio compartido entre el hongo y las raíces de la planta. (Camargo *et al.*, 2012; Puetate 2019; Verdugo 2022).

Además, universalmente es aceptado que las micorrizas estimulan el crecimiento, desarrollo y nutrición en las plantas, especialmente en suelos de baja y moderada fertilidad, por lo que favorecen principalmente aspectos de desarrollo y fisiología general de la planta y específicamente, crecimiento, morfología de la raíz, absorción y disponibilidad de nutrientes (Prieto *et al.*, 2011; Saldaña *et al.*, 2022).

Al mismo tiempo, las micorrizas se categorizan según el hongo hospedante, considerando sus atributos morfológicos, grado de penetración en la planta y tejido vegetal, diversidad de hifas y la variedad de taxones participantes. A nivel ecosistémico, las micorrizas conforman una comunidad de especies fúngicas altamente compleja. Esta complejidad ha sido objeto de investigaciones anteriores debido a su impacto en la diversidad de especies vegetales. (Abarca, 2021)

Es decir, en el nivel de cada comunidad, los hongos arbusculares expresan una serie de características potenciales como la posibilidad de transportar una gran cantidad de nutrientes que luego son dejados a disposición de la planta para proveer resistencia a distintos factores tanto

bióticos como abióticos que a su vez otorgan una mayor supervivencia en cambios climáticos y ataques contaminantes (Velázquez, 2010; Reyes *et al.*, 2020).

Cabe mencionar que la identificación de esporas se realiza en diferentes países que a su vez dan como claridad cual puede ser el género más relevante frente a una zona en específico, por ejemplo, Cuba *et al.*, (2020) afirma que el género con mayor población fueron *Glomus*, *Entrophospora* y *Acaulospora* en el bosque de Huamantanga Perú. Así mismo la investigación de Naranjo *et al.*, (2022) realizada en tres suelos costeros de Ecuador, donde se evidencia la población pilar *Glomus*. Se resalta el género *Glomus* como cosmopolita en diversos estudios realizados tanto en Colombia como en variaciones de otras investigaciones fuera del país.

2.1.2 *Estado actual del problema*

Cada día se hace necesario profundizar en diferentes disciplinas que abarcan principalmente materia agraria y los métodos convencionales de la agricultura, no obstante, desde la década del sesenta, se viene cambiando radicalmente el panorama de la agricultura; principalmente en el de la producción. Desde que se viene incorporando semillas híbridas hasta los transgénicos, que pasa por el uso excesivo de agrotóxicos para cada producto de agroexportación. *La presencia de corporaciones transnacionales en Colombia modificó el mapa de concentración del capital en el rubro agrícola, incorporando los avances tecnológicos importados directamente desde las ciudades principales* (Ortega, 2009; Ochoa, Sanz & Olmo 2020). Por otra parte; la importancia que tiene un producto por región, como el plátano para África, el maíz para EE. UU. entre otros, son transitorios y que no cuenta con dificultades de producción, no obstante, años después empiezan aparecer enfermedades en los cultivos, y uno de los métodos de control fue la aplicación de agrotóxicos, incentivando la producción en masa y dejando un lado los beneficios y bondades que ofrece el suelo (Jaisme *et al.*, 2002; Echeverría & Gatica 2023)

Con relación a esto, según Marín *et al.*, (2017), se destaca el impacto negativo que la ganadería tiene sobre el suelo, especialmente en los sistemas tradicionales de pastoreo extensivo, los cuales causan cambios en la estructura natural del suelo. Sin embargo, Murgueitio (2003) sostiene en su investigación que una gran parte de las áreas naturales en el trópico están siendo transformadas en sistemas de ganadería intensiva, abarcando un total de 458 millones de hectáreas. Esto representa aproximadamente un 11% de la expansión agropecuaria destinada a la ganadería y el pastoreo de animales domésticos.

Así mismo, los fertilizantes químicos tienen efectos negativos a ser aplicados al suelo, causando deterioro en la composición natural del suelo, aunque desde hace décadas se trabaja en una solución asertiva para el manejo de cultivos, en algunos cultivos se utiliza la micorriza como

técnica biológica, sin embargo, como lo es para los pastos, se tiene poca información, ya que, muchos de los estudios están más dirigidos hacia algunas leguminosas y pocas gramíneas. Esta relación es la clave en la producción para disminuir aplicaciones químicas, sobre todo en la utilización de fosfatos, siendo este clave para una mejor producción y formación foliar de la planta, este mismo efecto genera la micorriza en asociación con la planta (Noda, 2009; Carrillo *et al.*, 2022).

2.1.3 *Preguntas problema*

- ¿Cuáles son los géneros de hongos que forman micorrizas arbusculares que se encuentran asociados a suelos utilizados en actividades agropecuarias y bosques presentes en la Macarena, Meta?

- ¿Existe una diferencia significativa en la diversidad de las poblaciones de hongos formadores de micorrizas arbusculares entre las zonas agropecuarias y los bosques nativos, lo cual permite visualizar el impacto causado por el cambio de uso del suelo para la ganadería?

3 Capítulo III

3.1 Justificación

El presente trabajo nace de la necesidad de generar y consolidar información de las especies de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociadas a los suelos de diferentes zonas del área de caño cristales. Dada la importancia ecológica de esta área (Montealegre, 2023), por ser una reserva natural de Colombia y encontrarse en el marco de la Agenda Regional I+D+i de la serranía de la Macarena – caño cristales, y debido a que ha sufrido problemáticas sociales asociadas al conflicto armado (Castro & Roldán 2022) y a deforestaciones masivas (García, 2020).que han generado un deterioro del ecosistema, ocasionando perdida de la biodiversidad, sin que se llegue a conocer o documentar.

Es importante resaltar, que de los pocos trabajos académicos para la zona de estudio, se han centrado en la macrobiota, es decir: en peces, anfibios, reptiles y algo de vegetación. Sin embargo, se desconoce muchos aspectos de la microbiota de la zona especialmente de hongos simbióticos. De ahí que, este trabajo, servirá de base para futuros investigadores, como aporte de conocimiento científico en cuanto a hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) y su uso como una alternativa agroecológica en los sistemas de producción agrícolas de cultivos de la región, así como también, que permitan impulsar procesos de biorremediación y bioaumentación de las poblaciones existentes, que generen e impulsen la conservación de las especies nativas, y un uso más eficiente en la agricultura.

Adicionalmente, con estos procesos de obtención de micorrizas, se pretende generar una apropiación de conocimiento a las comunidades de esta zona, con el fin de formar los saberes para la obtención de la propagación de las especies nativas, permitiendo incentivar una agricultura

amigable con el medio ambiente en términos de ampliación de bioinsumos o bioinoculantes nativos, que hagan más eficiente el uso de los suelos, así como también la disminución de los posibles daños causados por la aplicación de los agroquímicos.

Es importante considerar que este estudio no solo representa una contribución única al entendimiento global de la formación de micorrizas, sino que también introduce descubrimientos relevantes que destacan frente a otras investigaciones previas. A pesar de la existencia de trabajos relacionados en el ámbito de las micorrizas, la singularidad de nuestro enfoque en la macarena resalta la necesidad de considerar las particularidades de cada entorno.

Inclusive los resultados obtenidos revelan patrones y procesos específicos que difieren de manera notable de estudios comparativos realizados en otras ubicaciones. Esta distinción no solo resalta la importancia de abordar la formación de micorrizas desde una perspectiva regional, sino que también subraya la relevancia de la macarena como un ecosistema único que influye en los mecanismos de desarrollo de estas asociaciones simbióticas.

4 Capítulo IV

4.1 Marco teórico

4.1.1 *La rizosfera*

Así también lo descrito por Saldaña (2022), la rizosfera es una zona vital donde se produce una interacción dinámica entre la microfauna, macrofauna y las raíces de las plantas, estableciendo una relación simbiótica. Esta zona es crucial, ya que los microorganismos presentes desempeñan un papel fundamental en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, especialmente en suelos con baja vida edáfica. La destrucción de estos microorganismos puede tener un impacto considerable en la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Por lo tanto, es fundamental preservar y promover la salud de la rizosfera, ya que contribuye significativamente al suministro y acceso de nutrientes necesarios para el crecimiento vegetal.

La historia que rodea el descubrimiento y la eventual aceptación de los beneficios de esto ha experimentado episodios de progreso y retroceso. Estos avances han mantenido una estrecha interconexión con el progreso científico, la evolución de las tecnologías que habilitan su investigación, y las mutables demandas políticas y socioeconómicas del periodo correspondiente. (Sánchez de Prager, 1999).

Por tal motivo y como lo menciona Silva y Montoya, (2022).

Ante los diversos fenómenos naturales y antropogénicos que se desarrollan a nivel global se hace necesario el uso de herramientas biotecnológicas que maximicen las capacidades de respuesta de los organismos en sus múltiples entornos. Los hongos micorrizas arbusculares (HMA) son la alternativa óptima para satisfacer la demanda actual del sector agrícola en armonía con el ecosistema

4.1.2 *¿Qué son las micorrizas arbusculares?*

Las micorrizas, término derivado de las palabras griegas "mico" (hongo) y "rriza" (raíz), representan una relación simbiótica entre los hongos y las raíces de las plantas, conocida como la relación micobionte/fotobionte. Este concepto fue primero conceptualizado por el botánico alemán Albert Bernard F. en 1885. En esta simbiosis, la planta brinda al hongo un microclima favorable y carbohidratos, a cambio, el hongo facilita la absorción de agua y nutrientes esenciales para la planta. Esta interacción entre los elementos biológicos, las raíces y el suelo da origen a una región denominada rizosfera. En este espacio, se establece una sincronizada interrelación que contribuye a mejorar las características físicas y químicas del suelo, generando condiciones ambientales más propicias. Entre los beneficios se incluyen una mayor absorción de nutrientes, una mejor disponibilidad de agua, la mejora en la estructura del suelo y una protección contra los patógenos del suelo. (Sánchez de Prager, 2010; Saldaña *et al.*, 2022).

En efecto, las micorrizas son una simbiosis mutualista entre hongos y plantas que beneficia tanto al hongo como a la planta huésped. Esta asociación mejora las propiedades del suelo, promoviendo un ambiente más propicio para el crecimiento de las plantas y a su vez contribuye a la salud y productividad de los ecosistemas terrestres. (Saldaña *et al.*, 2022).

La interacción con otros microorganismos del suelo, como la inoculación con rizobacterias, puede resultar en un incremento notable de la colonización por micorrizas arbusculares (MA), lo cual se traduce en un efecto positivo para impulsar el desarrollo de las plantas (Seguel, 2014; Trejo *et al.*, 2021). En el contexto del trópico húmedo, con un enfoque particular en el ecosistema amazónico del Guaviare, las micorrizas arbusculares emergen como un valioso recurso

microbiológico dentro de los sistemas naturales. En esta perspectiva, se han examinado tácticas dirigidas a preservar y aumentar la capacidad inherente de las micorrizas autóctonas, con el objetivo de elevar la calidad nutricional de los pastizales en la zona. Se subrayan en este enfoque la gestión de las gramíneas del género *Brachiaria*, la inoculación con micorrizas, así como la valoración tanto de la producción forrajera como de su perfil nutricional (Salamanca 1999; Vallejos-Torres *et al.*, 2019).

Por otro lado, existen diversas metodologías para clasificar los hongos que participan en la formación de micorrizas arbusculares (MA). Estas incluyen criterios basados en la colonización de las raíces y ciertos atributos morfológicos de las esporas, como su desarrollo y germinación, la estructura hifal, la cantidad y naturaleza de sus componentes, la presencia de características ornamentales, así como sus dimensiones y coloración. Además, los aspectos moleculares han surgido como una herramienta crucial en la actual clasificación de las MA. Aunque se reconoce ampliamente la relevancia de la simbiosis entre plantas y Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) en todo el mundo, subsisten vacíos en nuestra comprensión en lo que respecta a la configuración y la operatividad de estas comunidades en agroecosistemas tropicales. Estos aspectos particulares aún no han sido exhaustivamente investigados mediante estudios detallados (Chávez, 2020).

Dentro del marco colombiano, la mayoría de las investigaciones se han orientado hacia el análisis de los beneficios derivados de la simbiosis entre plantas y hongos, con un enfoque particular en una amplia gama de anfitriones. Estos estudios han priorizado áreas de gran relevancia como la optimización de la productividad agrícola, el fomento de la nutrición vegetal y la reducción sustancial de la demanda de fertilizantes. Estas investigaciones han destacado la viabilidad de emplear estos microorganismos tanto en sistemas de producción convencionales

como en aquellos orientados hacia la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente de estos microorganismos en sistemas (Rey *et al.*, 2005; Vallejos *et al.*, 2019), sin embargo, La diversidad de HFMA ha sido estudiada a diferentes niveles jerárquicos, pero aún, se desconoce el papel de esta diversidad en el establecimiento de procesos simbióticos efectivos con diversas especies de vegetales, especialmente de pasturas. Con todo esto, es fundamental reconocer que las comunidades de HFMA son inherentemente cambiantes a lo largo del tiempo, y esta dinámica puede ser influenciada por una serie de factores. Tanto las propiedades del suelo, incluyendo sus aspectos físicos, químicos y biológicos, como las condiciones climáticas desempeñan un papel crucial en esta modulación. En el contexto particular del trópico colombiano, estas condiciones climáticas están íntimamente ligadas a la altitud y tienen un impacto significativo en la composición y el comportamiento de estas comunidades de HFMA.

4.1.3 Clasificación de las micorrizas morfología y fisiología

Según Sánchez de Prager (2010) afirma que, la formación de agrupaciones de micorrizas surge como resultado de la colonización en plantas que mantienen una relación simbiótica. Estas micorrizas pueden ser categorizadas en varios tipos distintos: ectomicorrizas, endomicorrizas, ectendomicorrizas, micorrizas arbusculares (MA) y ericoides. Las micorrizas arbusculares representan una simbiosis presente en aproximadamente el 80% de todas las plantas de distintos biomas en nuestro planeta. Dentro de ese 80% de plantas simbióticas (fitobionte), las micorrizas arbusculares constituyen aproximadamente el 95%. Los hongos que participan en la simbiosis micorrícica arbuscular (HMA) exhiben ciclos de vida con elementos distintivos, como esporas de origen sexual, micelio que se extiende fuera de las raíces (extrarradical), micelio que penetra las raíces (intrarradical), formación de estructuras llamadas apesorios, presencia de vesículas en

algunos géneros, desarrollo de arbusculos y células auxiliares en ciertos géneros, entre otras estructuras únicas con funciones específicas. (Schübler y caminante, 2010, como se citó en Álvarez, 2018, p. 1), Estas características se emplean frecuentemente para identificar y categorizar estos hongos, considerando una serie de rasgos diagnósticos como la variabilidad en la forma de las hifas, la coloración, el tamaño y las distintas formas presentes Núñez, (2020).

Por otro lado, tenemos las ectomicorrizas, las cuales han sido catalogadas como asociaciones simbióticas fundamentales que se desarrollan en bosques de climas templados hasta boreales, extendiéndose incluso a regiones tropicales y subtropicales. Estas simbiosis son un puente vital entre una variedad de plantas, incluyendo especies maderables, herbáceas y gramíneas perennes, en su mayoría pertenecientes a grupos botánicos como las Gimnospermas y algunas Angiospermas (Sarmiento & Sarmiento, 2021). Estas relaciones simbióticas, ofrecen una serie de características distintivas, entre las que se incluyen:

1. **Diversidad Biológica Adaptativa**, las ectomicorrizas establecen una unión altamente adaptable entre las raíces de una amplia gama de plantas y hongos. Esta asociación tiene la capacidad de ajustarse a diversos entornos, desde los rigores de los bosques boreales hasta las condiciones cambiantes de las regiones tropicales, asegurando la supervivencia de muchas especies vegetales.

2. **Apoyo Nutricional**, las ectomicorrizas desempeñan un papel crucial en la absorción de nutrientes, especialmente minerales y agua, del suelo. Los hongos involucrados extienden sus hifas en el sustrato, aumentando significativamente la capacidad de las plantas para acceder a recursos subterráneos, enriqueciendo así su crecimiento y desarrollo.

3. **Resiliencia Frente a Estrés Ambiental**, estas simbiosis ofrecen a las plantas una mayor resistencia a condiciones adversas como sequías, suelos empobrecidos y contaminantes. La red de

hifas fúngicas actúa como una extensión del sistema radicular, mejorando la eficiencia en la captación de nutrientes y la adaptación a situaciones estresantes.

4. Ciclo de Nutrientes y Sostenibilidad del Ecosistema, las ectomicorrizas influyen en la liberación y captura de nutrientes en el suelo, promoviendo un equilibrio en el ciclo de nutrientes del ecosistema forestal. Esta interacción tiene un impacto directo en la salud general del bosque y en la sostenibilidad a largo plazo.

5. Promoción de la Biodiversidad, al fomentar la coexistencia de diversas especies vegetales, las ectomicorrizas contribuyen a la biodiversidad de los bosques. La interdependencia entre plantas y hongos crea un entorno propicio para la coevolución y la cohabitación de múltiples organismos.

Figura 1.

Tipos de colonización de micorrizas

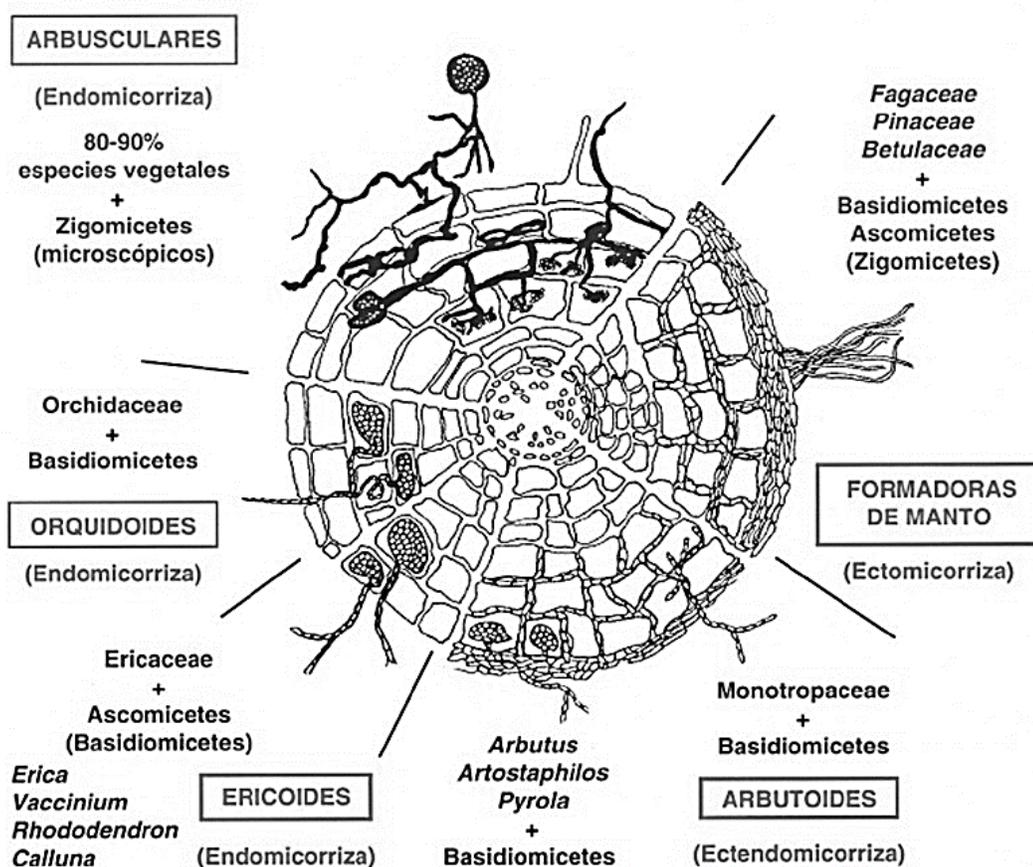


Figura 1. Esquema de los diferentes tipos de colonización producidos por los hongos micorrízicos. Tomado de Cruz Higareda (2014).

Recopilando conceptos y publicaciones de los diversos tipos de clasificación de micorrizas, podemos encontrar información proporcionada por varios autores. Entre ellos se encuentran Siqueira y Franco (1998), citados por Sánchez de Prager (2007), así como Espitia, Acosta y Cano (2022), quienes afirman que hay dos grandes grupos de micorrizas: las ectomicorrizas y las endomicorrizas, además de mencionar un tercer tipo que se encuentra en un punto intermedio, al cual algunos escritores han denominado como ectendomicorrizas (**Figura 1**).

Las ectendomicorrizas son asociaciones simbióticas entre hongos micorrízicos y las raíces de plantas, en las cuales los hongos penetran en las células internas de las raíces de las mismas, formando estructuras especializadas llamadas "hifas intracelulares". Estas hifas permiten el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta, beneficiando ambos organismos. Las ectendomicorrizas son menos comunes que otros tipos de micorrizas, como las ectomicorrizas y las endomicorrizas, pero desempeñan un papel importante en la absorción de nutrientes y en la salud de ciertas plantas en diversos ecosistemas Sánchez de Prager (2007).

En resumen, las ectomicorrizas son un nexo esencial en una variedad de ecosistemas boscosos, abarcando una gama geográfica amplia y diversa. Estas simbiosis ilustran la interconexión sorprendente entre organismos aparentemente dispares y resaltan su importancia en la funcionalidad, resiliencia y equilibrio de los ecosistemas forestales a lo largo del mundo.

5 Capítulo V

5.1 Materiales y métodos

5.1.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el municipio de la Macarena, en el departamento del Meta, en donde se seleccionaron tres fincas ganaderas aledañas al casco urbano y tres zonas de bosque ubicadas en diferentes puntos geográficos, como se observa en la **figura 2** y **tabla 1**. La selección de los sitios de muestreo obedece a la representatividad en términos de uso de suelo (para el caso de la ganadería), facilidad de acceso y disponibilidad de los propietarios para permitir la toma de las muestras, en las fincas ganaderas. En las zonas de bosque, se tomaron los puntos que tuvieran vegetación representativa de la zona, principalmente de la familia *Arecaceae* (Ver **figura 3**).

Figura 2.

Área de estudio y toma de muestras de campo

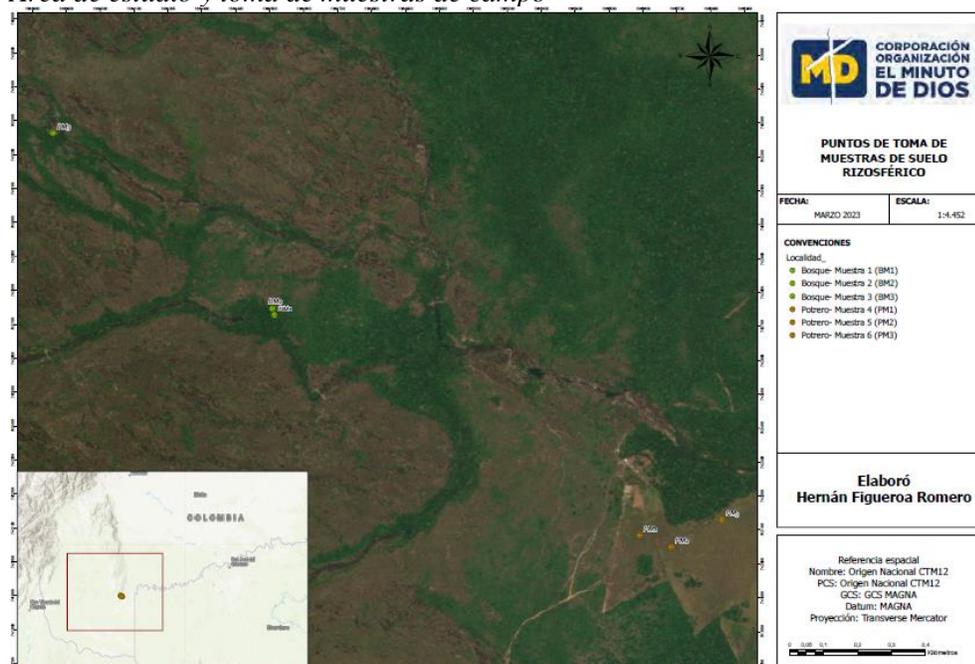


Figura 2. Ubicación de las áreas seleccionadas para la toma de muestras de suelo rizosférico necesarias para el desarrollo de la investigación. Puntos marcados como Sitio BM1: Bosque- Muestra 1.; Sitio BM2:

Bosque- Muestra 2.; Sitio BM3: Bosque- muestra 3.; Sitio PM1: Potrero- muestra 1.; Sitio PM2: Potrero- muestra 2.; Sitio PM3: Potrero- muestra 3. Autor (2023).

Para la zona, según Díaz & Posada (2021) se presenta una temperatura promedio que oscila entre los 22°C y 30°C. Sin embargo, durante la temporada seca, que va de diciembre a marzo, las temperaturas suelen ser un poco más altas, con máximas que alcanza los 32°C o más., experimenta lluvias abundantes durante la temporada de invierno, con un promedio de precipitación mensual que puede superar los 200 mm en los meses más pluviosos. Durante la temporada seca, la precipitación disminuye significativamente, y los meses de diciembre y enero son los más secos, con menos de 50 mm de precipitación en promedio.

5.1.2 Toma de muestras en campo

Se realizó un muestreo al azar de suelo rizosférico en las fincas ganaderas y zonas de bosque descritas en el ítem anterior (**figura 2 y tabla 1**). Una vez ubicados los puntos de muestreo se procedió a tomar una muestra de 1.5 kg de suelo (ver **figura 3**), que fue depositado en bolsas de plástico, las cuales fueron rotuladas y conservadas en cavas de icopor para su traslado al laboratorio de ciencias de la Granja Agroecológica UNIMINUTO, ubicado en el municipio de Villavicencio, Vereda Barcelona.

Figura 3.

Zonas seleccionadas para la toma de muestras



Figura 3. Proceso de toma de muestras de suelo rizosférico. A, B) Sitio BM1: Bosque- Muestra 1., C, D) Sitio BM2: Bosque- Muestra 2., E, F) Sitio BM3: Bosque- muestra 3., G, H) Sitio PM1: Potrero- muestra 1., I, J) Sitio PM2: Potrero- muestra 2., K, L) Sitio PM3: Potrero- muestra 3. Autor (2023).

Las muestras de cada uno de los sitios de muestreo se subdividieron en dos sub-muestras, las cuales fueron utilizadas en dos tipos de procedimientos diferentes, según el objetivo a cumplir: 1 kg para los procesos relacionados con la extracción de las esporas de los hongos formadores de micorrizas arbusculares 0,5 kg necesarios para procesos de determinación de pH de cada punto de muestreo

5.1.3 Extracción e identificación de esporas de Hongos formadores de micorrizas arbusculares- HMA

Del 1 kg de suelo de cada lugar de muestreo se tomaron 5 sub-muestras, cada una constaba de 100 g de suelo. A estas se les realizó la extracción de esporas mediante la técnica de decantación y tamizado húmedo (Gerdemann y Nicolson, 1963), la cual consistió en pasar el suelo húmedo por cuatro tamices organizados de manera consecutiva de mayor a menor apertura de poro (425, 250, 106 y 38 μ m). Una vez tamizado el suelo, se procedió a rescatar el material obtenido en los tamices de 106 y 38 μ m, este material fue pasado a tubos falcon, en los que se realizó la adición de una

solución azucarada al 70%. Luego, se procedió a incorporar los tubos con la solución azucarada a una centrifuga en la que se hizo un centrifugado a 3500 rpm por 5 minutos, según el procedimiento descrito por Sánchez de Práguer *et al.*, (2010) ver **figura 4**.

Figura 4.

Precedimiento para la extracción de esporas del suelo rozosferico.

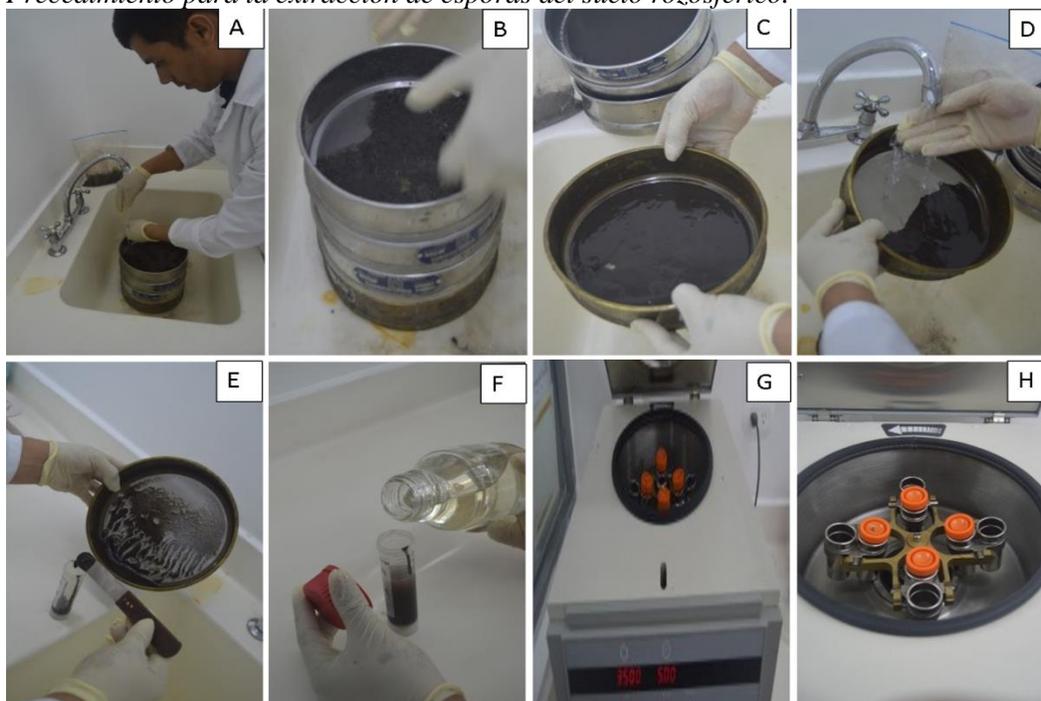


Figura 4. Extracción de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares mediante la técnica de decantación y tamizado en humedo seguida de centrifugación en solución azucarada. (A-B): Tamizado huemedo con 100 gr de suelo a travez de cuatro tamices consecutivos, C,D: rescate del material obtenido en los tamices de 106 y 38 μ m para su posteior empacado en tubos; (E, F)Uso de tubos falcon para el rescate de material resultante de los ultimos dos tamices y agregado de solución azucarada para posterior centrifugación (G,H) Proceso de centrifugado a 3500 revoluciones por 5 minutos. Autor (2023).

Una vez centrifugado el material, se rescataron las esporas de los hongos formadores de micorrizas arbusculares que quedaron suspendidas y separadas del resto del suelo y se procedio a realizar un lavado con abundante agua para eliminar el exceso de azucar. Porsteriormente, con la ayuda de un estereoscopio, las esporas obtenidas en el paso anterior fueron agrupadas en

morfoespecies de acuerdo con su forma, tamaño y coloración (ver **figura 5A, 5B, 5C y 5D**). Después, se llevaron a cabo montajes semipermanentes de las diversas morfoespecies encontradas (ver **figura 5E y 5F**) utilizando una solución de alcohol polivinílico lactoglicerol (PVLG), con y sin la adición del reactivo de Melzer (Schenck y Pérez, 1990). Por último, con la ayuda de un microscopio binocular (ver **figura 5G y 5H**) se realizó la identificación mediante las características morfológicas de las esporas (tamaño, color, acoplamiento de la hifa de sostén, contenido lipídico y espesor de la pared celular, entre otros), usando las claves taxonómicas de Sánchez de Práguer *et al.*, (2010); Oehl *et al.*, (2011); Redecker *et al.*, (2013).

Figura 5.

Método de visualización e identificación de esporas de HMA.

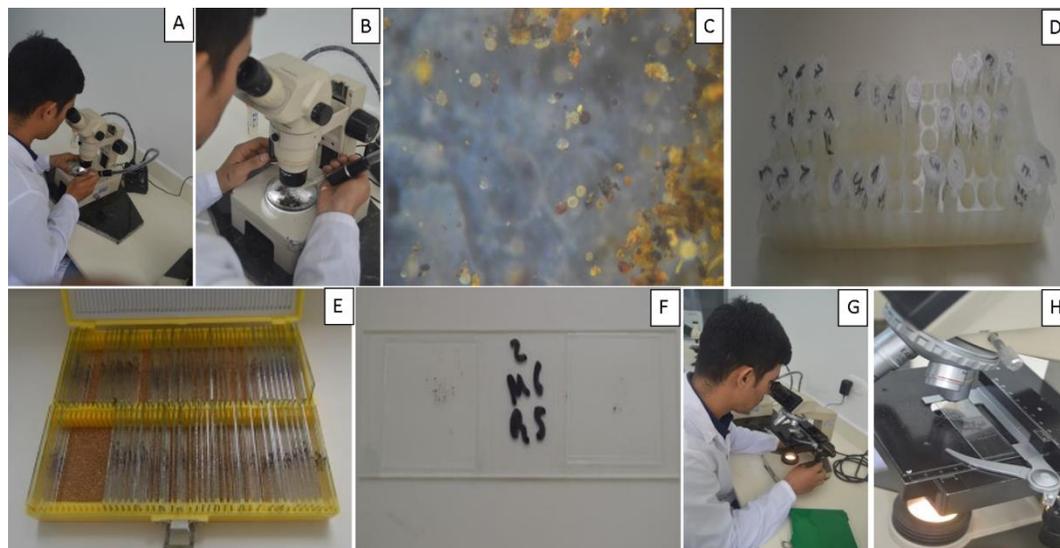


Figura 5. Proceso de clasificación e identificación de HMA. (A, B, C) Identificar y separación de esporas por tamaño, color y forma, (D) tubos eppendorf para el almacenado de esporas uno por cada forma encontrada “clasificados de 1 a 7”. (E, F) placas semipermanentes rotuladas de acuerdo con la forma de cada espora separada en el paso anterior, (G, H) visualización al microscopio para su posterior conteo, seguimiento fotográfico e identificación Autor (2023).

5.2 Determinación de la abundancia de los Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) en los sitios de muestreo y su relación con el pH

5.2.1 *Conteo de número de esporas presentes en las muestras de suelo de cada sitio de muestreo*

La abundancia o cuantificación del número de esporas de HMA en cada sitio de muestreo se determinó con el conteo de esporas presentes en 5 repeticiones de 100 g de suelo, de cada sitio de muestreo. Lo anterior, se realizó mediante la ecuación propuesta por Sieverding (1983):

$$N^{\circ} \text{ Esporas} = (N^{\circ} \text{ Esporas contadas} / \text{Peso de la muestra}) * (P_i / P_f)$$

Donde p_i es el peso inicial de la muestra usada para determinar la humedad de la misma y p_f es el peso final de la muestra para determinar humedad.

5.2.2 *Medición del pH en las muestras de suelo*

La medición del pH a las muestras de suelo obtenidas de cada sitio de muestreo se realizó siguiendo lo descrito por Beretta *et al.*, 2014 con modificaciones. Es decir, se pesaron 20g de suelo y se disolvieron en 50 ml de agua destilada estéril en un Erlenmeyer (relación de la solución suelo-agua es 1:2,5). Esta solución se dispuso en un plato con agitador magnético durante 15 minutos. Posteriormente, se dejó reposar y se realizó la medición del pH con la ayuda de un equipo multiparámetro con medidor de pH (OHAUS). Dicho procedimiento se realizó 5 veces a cada muestra de suelo o sitio. (Ver **figura 6**).

Figura 6.

Instrumento técnico para la medición de pH

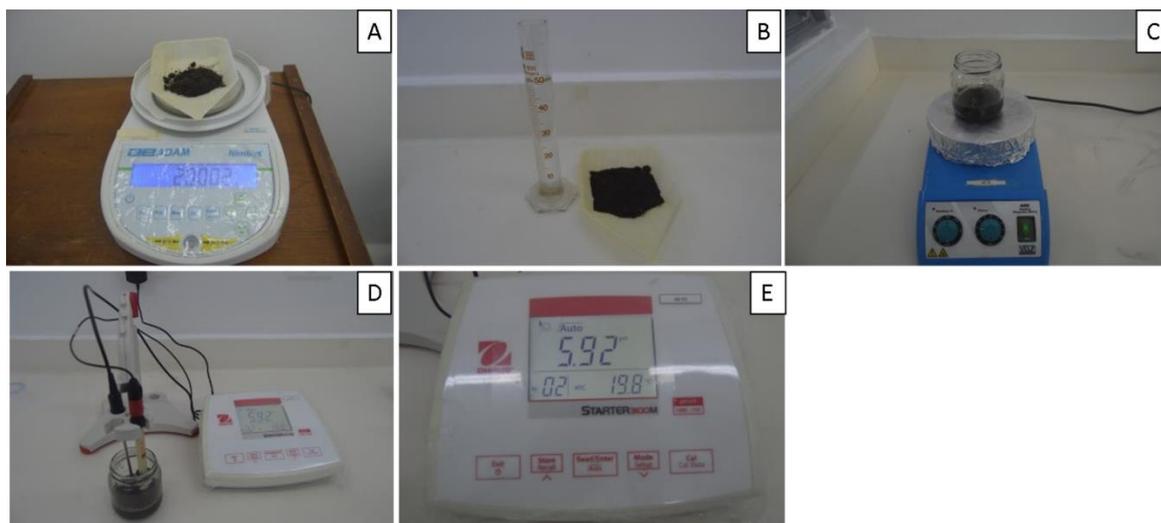


Figura 6. Proceso de medición de pH en las muestras del estudio. (A) pesaje de 20g de suelo rizosférico (B) 20g de suelo y medición de 50ml de agua destilada (C) homogenización de la solución agua y suelo en el agitador magnético por 15 minutos (D, E) Multiparámetro con pH-metro para medir el pH en cada una de las muestras obtenidas Autor (2023).

5.2.3 *Diseño experimental y análisis estadístico*

Se estableció un diseño y muestreo de suelo completamente al azar en las dos zonas o tipos de uso de suelo (Bosque y potrero o pastizal) de acuerdo con el protocolo estandarizado por Sánchez de Prager (2010). Por cada zona se seleccionaron tres localidades (3 fincas ganaderas y 3 zonas o sitios en bosque) de las cuales obtuvieron 3 muestras de suelo rizosférico. A cada muestra se realizaron 5 eventos de extracción de esporas (5 repeticiones por muestra) para desarrollar el análisis de número de esporas en 100 g de suelo tamizado, siguiendo los métodos descritos por Sánchez de Prager (2010). Se realizaron análisis de medias, mediante el análisis estadístico de **Prueba t-studens**, para comparar si existen diferencias significativas entre el número de esporas entre las fincas ganaderas/potreros con respecto a las zonas de bosque.

Para el análisis del efecto del pH sobre la abundancia de las esporas de los hongos formadores de micorrizas arbusculares, se tomaron los 30 datos resultantes de las 5 repeticiones de cada una de las 6 muestras del estudio ($5 \times 6 = 30$), y se correlacionaron con los datos de número de esporas obtenidos en cada sitio de muestreo, mediante el cálculo del índice Pearson.

La Prueba t-studens y el índice de correlación de Pearson se calcularon con la ayuda del programa estadístico PAST 4.0.

La selección de la prueba estadística Prueba t-studens y el índice de correlación de Pearson obedeció al comportamiento de los datos obtenidos y el diseño experimental y siguiendo las directrices planteadas por Flores *et al.*, (2017), en las que se constató que el tamaño de muestra era de 30, los datos presentaban una distribución normal y se realizaba una comparación de grupos independientes.

6 Capítulo VI

6.1 Resultados y discusión.

6.1.1 Cuantificación de la densidad de esporas de HMA de suelo rizosférico

Una vez analizada las 30 submuestras (5 repeticiones x 3 muestras de bosque x 3 muestras de pastizal=30) entre las que se encuentran las del bosque como del potrero, se registró un recuento total de 243.858 esporas de HMA en todo el estudio. Al comparar el bosque con el potrero, en términos de número promedio de esporas, es relevante, destacar que el bosque exhibe una densidad mayor de esporas (10,421.77/100 gr de suelo) en comparación con el potrero, que presenta un promedio de (5,835.467 esporas/100 gr de suelo) (ver figura 7). Es decir, que en el bosque se encuentran un 44% más de esporas que en los pastizales o potreros utilizados para ganadería.

Figura 7. Comparación de esporas entre las muestras de bosque y pastizal.

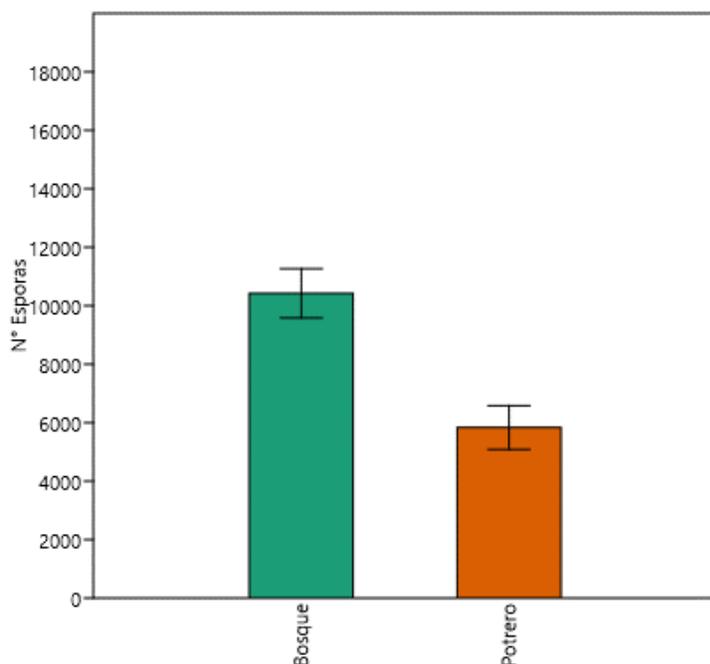


Figura 7. Comparación del número promedio de esporas presentes en los suelos de bosque y pastizales en la Macarena-Meta. Los valores observados corresponden a número promedio de esporas en 100 g de suelo de las dos zonas seleccionadas, pastos y bosque en espacios de la Macarena Meta. Autor (2023).

Luego de llevar a cabo un análisis comparativo descriptivo y gráfico entre los dos grupos de interés, se aplicó una Prueba t-studens para evaluar sus diferencias. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar una diferencia estadísticamente significativa ($n=30$; p-valor: 0.0000000000019209) en la densidad de esporas presentes en las muestras sometidas a análisis. Estos resultados subrayan que, de manera general, las muestras recolectadas en el entorno boscoso (*BM1.BM2.BM3*) presentan una considerable abundancia de esporas de HMA (Ver **figura 7 y 8; Tabla 1**) en contraposición a las muestras tomadas en el potrero (*PM1,PM2,PM3*). Este dato no solo confirma de manera contundente la cantidad de esporas entre ambos entornos, sino que también resalta la tenacidad de la diferencia estadística observada.

Tabla 1.

Datos utilizados en la toma de muestras y clave para su posterior procesamiento.

Localidad/ Zona	Coordenadas	Altura-msnm	pH suelo Promedio	N° espora/100g suelo Promedio \pm Desviación estándar
Bosque- Muestra 1 (BM1)	02° 15'57,2" N; 073° 48'08,1" W	328	4,23	7797,3 \pm 3164,8
Bosque- Muestra 2 (BM2)	02° 15'57,8" N; 073° 48'08,3" W	330	3,77	10864,1 \pm 2006,2
Bosque- Muestra 3 (BM3)	02° 16' 14,6" N; 073° 48' 29,2" W	353	3,62	12603,9 \pm 2894,1
Potrero- Muestra 4 (PM1)	02° 15'36.1" N; 073° 47'33.3" W	297	5,60	6019,8 \pm 3664,5
Potrero- Muestra 5 (PM2)	02° 15'35,0" N; 073° 47'30,3" W	293	6,77	6063,4 \pm 2969,1
Potrero- Muestra 6 (PM3)	02° 15' 37.6" N; 073° 47' 25.5" W	285	5,65	5423,2 \pm 2641,3

Tabla 1. Georreferenciación de las áreas o sitios de estudio seleccionados para la toma de muestras: Coordenadas, metros sobre el nivel del mar, pH promedio del suelo en cada sitio y Resultados del número promedio de esporas recolectadas en 100gr de suelo por cada muestra. Se presenta el promedio y desviación estándar calculados como resultado de las 5 repeticiones por cada sitio de muestreo. Autor (2023).

Se puede afirmar que en cada área de muestreo se identificaron regiones con densidades de esporas notables, como se muestra en la **Figura 8**. Es importante destacar que en la zona etiquetada

como BM3, se registró la mayor cantidad de esporas en comparación con las demás áreas, alcanzando un total de $12,603.9 \pm 2,894.1$. Sin embargo, es relevante observar que, en las muestras recolectadas en el potrero, esta densidad máxima por unidad de muestra fue de $6,019.8 \pm 3,664.5$.

En este contexto, y subrayando la relevancia de la presente investigación, es instructivo hacer referencia al estudio de García & Álvarez (2017) con un rango poblacional de esporas 452 a 932 en 100 gr de suelo, área destinada al cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en zona del altiplano central de Bolivia., el estudio de Naranjo *et al.*, (2022) con un número de esporas por cada 100 gr de suelo es de 206 a 550 aproximadamente en suelos de Guayaquil Ecuador que son utilizados en el cultivo de palma (*Phytelephas aequatorialis*). La comparación con estos estudios permite visibilizar gran abundancia de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares en la zona de la Macarena, dado que en algunos casos la diferencia en el número de esporas alcanza a ser hasta de 61 veces mayor.

Figura 8.

Resultados obtenidos del conteo de esporas por cada unidad de muestra seleccionada.

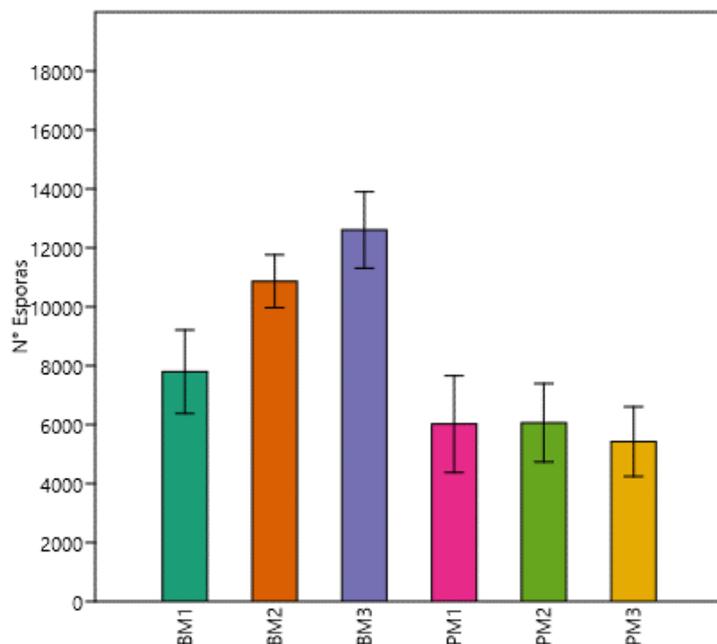


Figura 8. Resultado del número promedio de esporas por cada 100 g de suelo encontrados en cada uno de los sitios de muestreo de la zona de bosque (BM) y la zona de pastizal o ganadera (PM) que fueron parte de este estudio. Autor (2023).

Para suelos regionales tenemos el estudio de, Acevedo, Sierra & Gómez (2017) en Pasto kikuyo se obtuvo un total de 74 y 87 esporas promedio por cada 100 gr de suelo asociado a pasto de corte para ganadería semi-estabulado en zona de San Pedro de los Milagros Antioquia. Así mismo el estudio de PÉREZ *et al.*, (2015) obtuvo un resultado asociado a pasto colosuana (*Bothriochloa pertusa*) (670-1100; 640-1000 esporas/100gr de suelo) en suelos de San Marcos Sucre. Así mismo, Pérez *et al.*, (2013) identificaron un máximo de 1,000 a 1,800 esporas de HMA por cada 100 gr de suelo en fincas ganaderas del municipio de Tolú, Sucre, Colombia. En este caso, si bien la cantidad de esporas es superior a la registrada en el estudio de PÉREZ *et al.*, (2015), resulta inferior al recuento efectuado en la zona de potrero (ver **tabla 1**) de La Macarena, Meta.

Estas comparaciones resaltan la importancia de este trabajo al mostrar cómo las prácticas tanto ganaderas como agrícolas tiene un impacto significativo en la densidad de esporas, en el cambio de paisajismo y sobre todo en la recuperación de los suelos, lo que puede tener implicaciones importantes para la salud del ecosistema local.

Por último, pero igualmente importante, es esencial destacar que en las tierras de altillanura y áreas circundantes, la práctica intensiva de ganadería es un fenómeno relativamente reciente en comparación con otras regiones del país, sin embargo, se ha empezado a ver el efecto de ese cambio de uso de suelo para este tipo de prácticas, y ya se ha empezado a documentar y evidenciar el efecto sobre las poblaciones microbianas como los HFMA. Por ejemplo, en el estudio de Espitia, Acosta y Cano (2022), realizado en la granja agroecológica de UNIMINUTO, en el municipio de Villavicencio, se encontró una densidad de aproximadamente 7640,5 y 3323,1 esporas por cada 100 gramos de suelo en la zona de bosque y pastizal, respectivamente. Es relevante mencionar que

este bosque es de carácter secundario y ha sido designado como área de recuperación. Por lo que, al realizar una comparación entre el número total de esporas asociada a bosque y potrero (ver **figura 7**) de la Macarena con respecto al estudio de Espitia, Acosta y Cano (2022) se obtiene una diferencia del 49.8%, mayor en el presente estudio. Esto significa que los suelos de La Macarena, al no haber experimentado una intervención tan intensiva en forma de ganadería o actividades agrícolas, pueden considerarse relativamente jóvenes en términos de su desarrollo e impacto ambiental. Adicionalmente, ambos estudios permiten observar un menor número de esporas en zonas de pastizal, es decir en suelos que tienen una mayor intervención antrópica, lo que podría evidenciar una tendencia o efecto negativo de las prácticas ganaderas sobre las poblaciones de HFMA.

En este orden de ideas, este estudio resalta la notoria variación (en la densidad poblacional) que los suelos experimentan al cambiar de una región o localidad a otra. Así mismo, permiten ver que algunos patrones o efectos adversos sobre las poblaciones microbianas se mantienen si la presión, mal uso y prácticas no amigables con el medio ambiente se incrementan o sostienen en el tiempo. La variabilidad y tendencias poblacionales encontradas en los seis puntos de la Macarena no solo proporcionan información valiosa sobre la salud de los ecosistemas locales, sino que también se convierte en una herramienta esencial para la conservación y preservación del medio ambiente, asegurando que las futuras generaciones hereden un entorno natural lo más intacto y saludable posible. Sobre todo en territorios como el de la Macarena, en el que se tiene una gran diversidad biológica, étnica y en donde confluyen diversas problemáticas sociales que hacen más relevante lo encontrado. Sobre todo si se pretende que la información obtenida sea la base para empezar a tomar acciones en torno al uso racional del suelo en la zona de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior y centralizando la cosmovisión en cuanto a la historia de la Macarena y la influencia de diferentes actividades en la zona, es importante conocer que la Macarena se destaca por su enorme valor ecológico y turístico. En este territorio confluyen tres ecosistemas fundamentales para el equilibrio del país: el sistema andino, el orinocense y el amazónico. Desde 1953, comunidades campesinas han arraigado en sus tierras, impulsando una economía enfocada en la agricultura de subsistencia, la ganadería y, lamentablemente, el cultivo de coca (Serna, 2003; Espinosa, 2010; Guerrero, 2022).

A partir de 1964, las FARC surgieron en esta región y consolidaron su influencia en la extensa zona rural, convirtiéndose en la principal autoridad (Serna, 2003; Espinosa, 2010; Guerrero, 2022). Este hecho, limitó el acceso de investigadores y la comunidad científica en general, así como, diferentes herramientas y conocimiento asociados a la planificación, ordenamiento territorial y a prácticas sustentables con el ambiente. De ahí que, para la zona no se tengan mucha información sobre la biota microbiana, y su potencial uso para biorremediación de suelos. Lo cual se constituye en un dato preocupante, si se tiene en cuenta que mucha de esa biota se está perdiendo sin llegar a conocerse, por la deforestación y mal uso del suelo.

La información obtenida en este estudio, en términos de conocer los géneros de HFMA y la abundancia de esporas de estos, es un aporte importante al conocimiento de la biota del lugar, ya que, como lo menciona Espinosa, (2003), Pérez (2018), Costa *et al.*, (2021), diversas acciones o prácticas humanas están generando degradación del suelo y cambios irreversibles en dos áreas protegidas de Colombia: los Parques Nacionales Naturales Tinigua y Sierra de la Macarena. Es por ello, que con los resultados de esta investigación pretende visibilizar el posible efecto de la ganadería, sobre la estructura del suelo y sobre las comunidades microbianas que se encuentran en suelos como el de la Macarena.

6.1.2 Géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares nativos encontrados en las zonas de estudio de la Macarena- Meta

Como resultado de la extracción de esporas presentes en las 30 submuestras de las dos zonas principales de estudio (Bosque y pastizal) ubicadas en el municipio de la Macarena-Meta, se encontró un total de 36 morfo tipo o especies de esporas de HMA (ver **Tabla 2**). Las morfoespecies obtenidas se encontraron clasificadas taxonómicamente en tres órdenes (Diversisporales, Glomerales, Paraglomerales). De igual forma se encontró que el género *Glomus* presentó el mayor número de morfos con 17 formas diferentes, seguido de *Acaulospora* (13), *Gigaspora* (2), *Claroideoglomus* (2), *Paraglomus* y *Scutellospora* cada uno con una sola morfoespecie (**Tabla 2**).

Tabla 2.

Identificación y clasificación de esporas encontradas por cada unidad de muestras.

Clasificación/identificación			Zona de Muestreo		
Orden	Familia	Especie/morfoespecie	Bosque	Pastizal	Figura
Diversisporales	Acaulosporaceae	<i>cf Acaulospora scrobiculata</i>	X		10A
		<i>Acaulospora</i> sp. 1	X	X	9A
		<i>Acaulospora</i> sp. 2	X	X	9B
		<i>Acaulospora</i> sp. 3	X	X	9C
		<i>Acaulospora</i> sp. 4	X	X	9D
		<i>Acaulospora</i> sp. 5	X	X	9E
		<i>Acaulospora</i> sp. 6	X		10B
		<i>Acaulospora</i> sp. 7	X		10C
		<i>Acaulospora</i> sp. 8	X		10D
		<i>Acaulospora</i> sp. 9	X		10E
		<i>Acaulospora</i> sp. 10	X		10F
		<i>Acaulospora</i> sp. 11		X	11A
		<i>Acaulospora</i> sp. 12		X	11B
		Gigasporaceae	<i>Gigaspora</i> sp. 1	X	X
		<i>Gigaspora</i> sp. 2	X	X	9G

		<i>Scutellospora</i> sp. 1	X		10J
Glomerales	Claroideoglomeraceae	<i>Claroideoglomerus</i> sp. 1	X	X	9H
		<i>Claroideoglomerus</i> sp. 2	X	X	9I
	Glomeraceae	<i>Glomus</i> sp. 1	X	X	9J
		<i>Glomus</i> sp. 2	X	X	9K
		<i>Glomus</i> sp. 3	X	X	9L
		<i>Glomus</i> sp. 4	X	X	9M
		<i>Glomus</i> sp. 5	X	X	9N
		<i>Glomus</i> sp. 6	X	X	9Ñ
		<i>Glomus</i> sp. 7	X	X	9O
		<i>Glomus</i> sp. 8	X	X	9P
		<i>Glomus</i> sp. 9	X		10G
		<i>Glomus</i> sp. 10	X		10H
		<i>Glomus</i> sp. 11		X	11C
		<i>Glomus</i> sp. 12		X	11D
		<i>Glomus</i> sp. 13		X	11E
		<i>Glomus</i> sp. 14		X	11F
		<i>Glomus</i> sp. 15		X	11G
<i>Glomus</i> sp. 16		X	11H		
<i>Glomus</i> sp. 17		X	11I		
Paraglomerales	Paraglomeraceae	<i>Paraglomerus</i> sp. 1	X		10I

Tabla 2. Especies/morfoespecies encontradas en las zonas de Bosque y potrero o pastizal del Municipio de la Macarena -Meta. Clasificación taxonómica e información de la figura en la que se representa la espora de la morfoespecie identificada. Autor. (2023).

Como se observa en la **tabla 2**, la diferencia entre el número de especies o morfoespecies de hongos formadores de micorrizas arbusculares presentes en el bosque (27 morfo especies) con respecto a lo encontrado en los pastizales de las fincas ganaderas (26 morfo especies), de las que se tomaron las muestras, solo fue de una morfo especie. Sin embargo, si se logra apreciar, divergencias en la composición de los géneros en cada lugar, ya que *Paraglomerus*, *Claroideoglomerus* y *Scutellospora*, solo se encontraron en las muestras de zona de bosque (ver **figura 9, 10 y 11**).

Figura 9.

Esporas encontradas en todas las zonas de estudio.

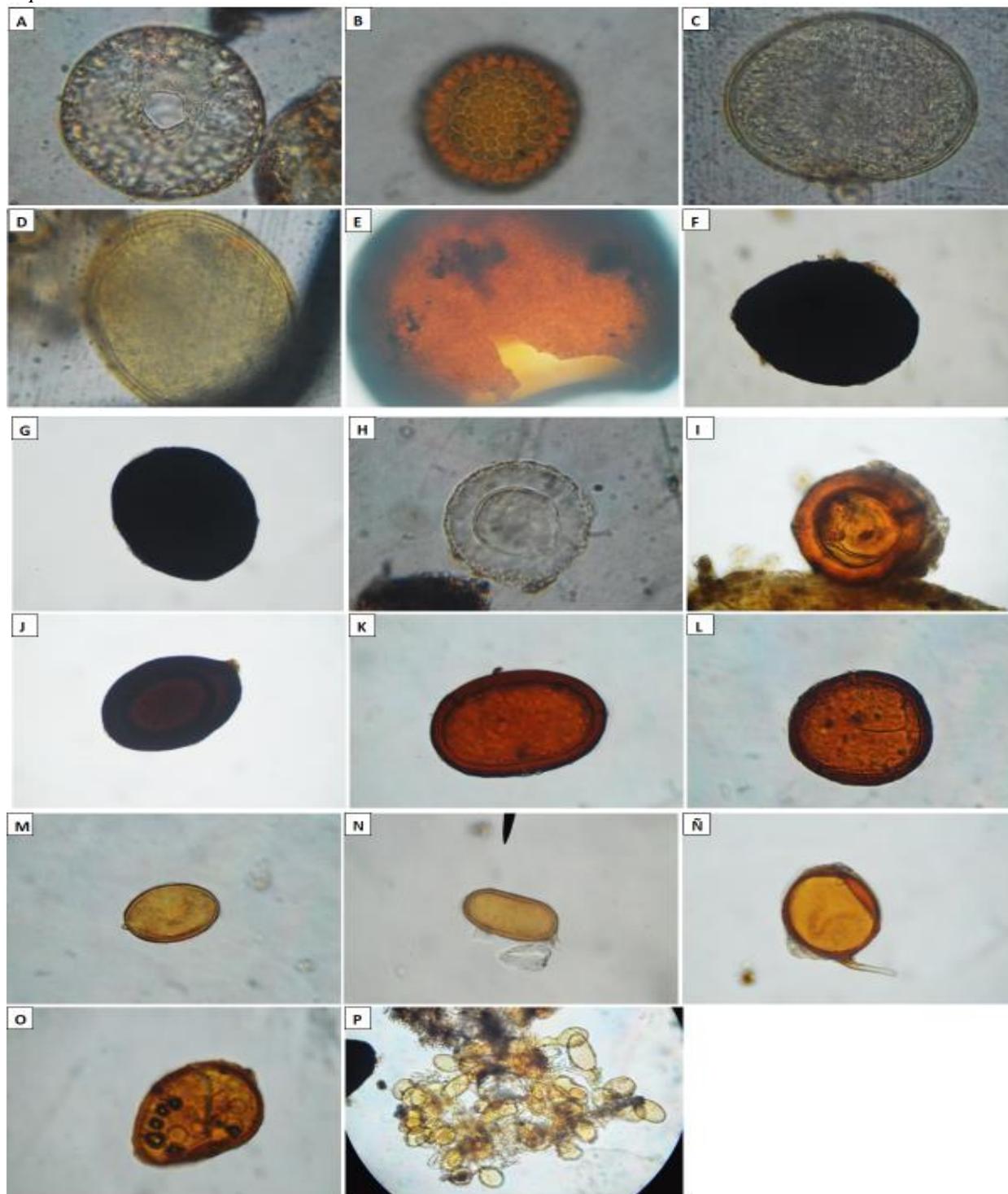


Figura 9. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas asociadas a ambas zonas de estudio: A) *Acaulospora* sp. 1 B) *Acaulospora* sp. 2, C) *Acaulospora* sp. 3, D) *Acaulospora* sp. 4, E) *Acaulospora* sp. 5, F) *Gigaspora* sp. 1, G) *Gigaspora* sp. 2, H) *Claroideoglossum* sp. 1, I)

Claroideoglopus sp. 2, J) *Glomus* sp. 1, K) *Glomus* sp. 2, L) *Glomus* sp. 3, M) *Glomus* sp. 4, N) *Glomus* sp. 5, Ñ) *Glomus* sp. 6, O) *Glomus* sp. 7, P) *Glomus* sp. 8. Autor. (2023).

Figura 10.

Clasificación de esporas encontradas solo en Bosque

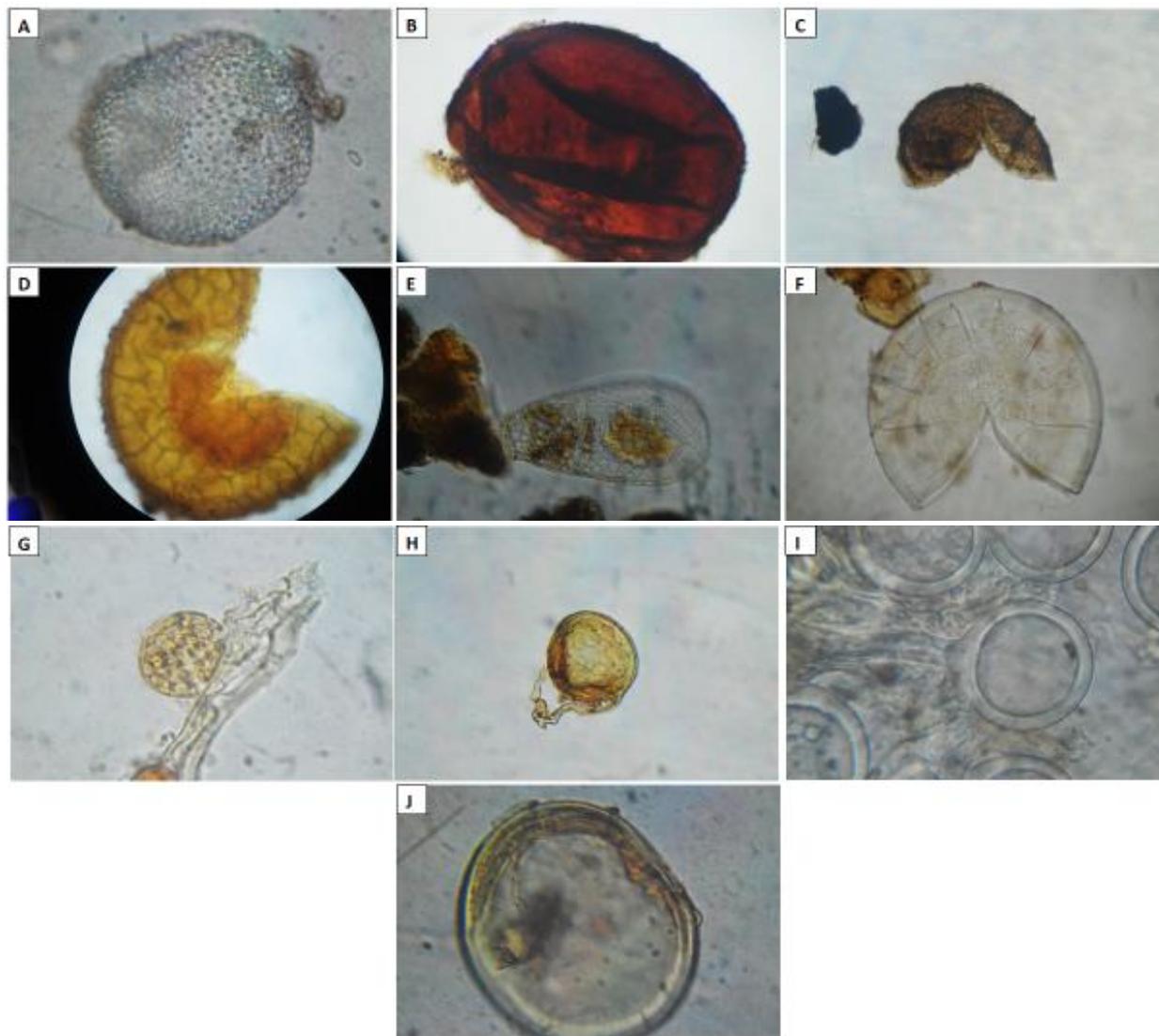


Figura 10. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas de manera exclusiva en zona de Bosque: A) *cf Acaulospora scrobiculata*, B) *Acaulospora* sp. 6, C) *Acaulospora* sp. 7, D) *Acaulospora* sp. 8, E) *Acaulospora* sp. 9, F) *Acaulospora* sp. 10, G) *Glomus* sp. 9, H) *Glomus* sp. 10, I) *Paraglomus* sp. 1, J) *Scutellospora* sp. Autor. (2023).

Figura 11.
 Clasificación de esporas encontradas solo en Pastizal.

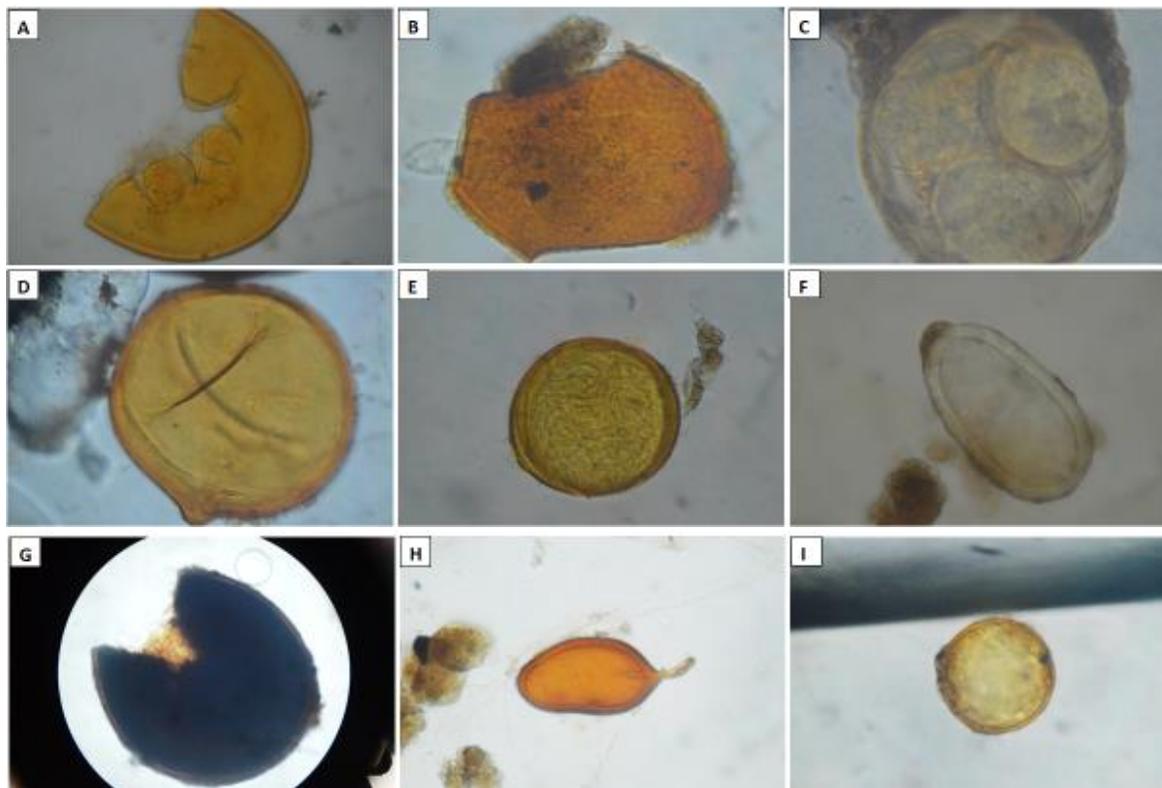


Figura 11. Esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares encontradas de manera exclusiva en zona de Pastizal o pradera: A) *Acaulospora* sp. 11, B) *Acaulospora* sp. 12, C) *Glomus* sp. 11, D) *Glomus* sp. 12, E) *Glomus* sp. 13, F) *Glomus* sp. 14, G) *Glomus* sp. 15, H) *Glomus* sp. 16, I) *Glomus* sp. 17. Autor. (2023).

Al comparar los resultados de la presente investigación con los obtenidos por Arancibia (2022) se observa una similitud en los resultados en relación con los géneros predominantes en el suelo rizosférico. Las esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de los géneros *Glomus* sp y *Acaulospora* sp fueron las más abundantes al igual que los resultados obtenidos, sin embargo, la investigación comparada se realizó en suelo chileno. Así mismo, la investigación realizada por Saldaña (2022), en los resultados obtenidos los géneros predominantes fueron *Acaulospora* sp y *Glomus* sp en suelos de la altillanura, datos que coinciden los obtenidos en esta investigación a diferencia en el número de esporas por cada lugar de muestra.

De hecho, Salgado et al., (2014) dentro de sus resultados se obtuvo un total de 943 esporas por 100g de suelo, y la predominancia en genero de esporas se encuentra asociado a *Acaulospora* sp y *Glomus* sp en un cultivo de caña, responde a los mismos resultados obtenidos. Al mismo tiempo Restrepo (2019) en su investigación asociada a suelos de ganadería, la predominancia fue el género *Glomus* sp, con un total de 463 esporas por cada 100 gr de suelo. También Pallares (2020) afirma que, el género *Glomus* esta reportado como cosmopolita, siendo el de mayor distribución geográfica. La *Acaulospora* se encuentra más asociada a cultivos de aguacate, sin embargo, es común encontrarla en zonas boscosas.

Por lo tanto y de acuerdo con Wilches (2019) afirma que, los géneros *Acaulospora* sp y *Glomus* sp estos hongos demuestran una predominancia notable en comparación con otros géneros, principalmente debido a su ventajosa competencia. Su capacidad para aprovechar eficazmente los recursos, incluyendo el espacio y la tolerancia al pH del entorno, les permite prosperar y mantenerse en el medio ambiente de manera exitosa.

6.1.3 Relación del pH del suelo en la abundancia de los Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA)

Como se observa en la **figura 12** de acuerdo con los datos obtenidos en el estudio, al realizar la estimación del índice de correlación de Pearson, se evidencia que Si hay una correlación (-0,63347) entre el número de esporas y el pH del suelo de los sitios de muestreo, es decir, con una probabilidad de $p=0,00017153$, se evidencia que, a mayor pH en el suelo, se encuentra una menor densidad o número de esporas de HMA presentes en este (ver figura 12 y tabla 1).

Figura 12.

Índice de correlación de Pearson.

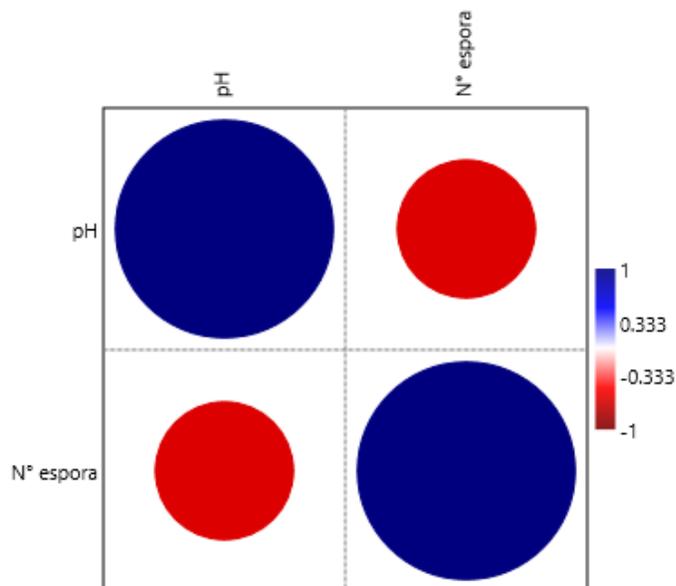


Figura 12. Resultado del índice de correlación de Pearson entre el número de esporas y el pH del suelo de los sitios de muestreo en la zona de bosque y pastizal. (Autor 2023).

De acuerdo con lo anterior, y realizando una revisión literaria se puede decir que este fenómeno se ha visto respaldado por Peña-Vega et al., 2007; Arocha *et al.*, 2019; Mañana *et al.*, 2021, quienes han encontrado y documentado una influencia del pH sobre las poblaciones de microorganismos como hongos y bacterias. La predominancia de uno de estos grupos sobre el otro, o de diferentes poblaciones del mismo grupo, está determinada por las condiciones locales, particularmente el pH del suelo y su contenido de humedad. En este diverso conjunto de microorganismos, se incluyen los hongos micorrízicos arbusculares, que mantienen una relación de simbiosis mutua con aproximadamente el 95 % de las especies que componen el reino vegetal (Arocha *et al.*, 2019).

Por lo tanto y de acuerdo con Peña *et al.*, (2007), Restrepo *et al.*, (2019), la tolerancia de las micorrizas arbusculares a la acidez y a altos niveles de aluminio es un tema debatido, pero en suelos ácidos tropicales del tipo Ultisol, estos factores aparentemente no afectan negativamente el

rendimiento de las micorrizas arbusculares nativas. Incluso se sugiere que estos hongos pueden acumular aluminio en su estructura, como el micelio, las vesículas y las células auxiliares.

El pH del suelo puede influir significativamente en la densidad de esporas de las micorrizas arbusculares (HMA) en el suelo debido a las concentraciones de elementos como aluminio (Al), hierro (Fe) y calcio (Ca). Un estudio reveló que los suelos con pH más bajo tenían una menor densidad de esporas en 100 g de suelo. Resulta intrigante observar los suelos fuertemente ácidos (con valores de pH de 5,3 y 4,94 respectivamente), la cantidad de géneros de esporas no es tan alta al tener suelos con pH neutro, es decir; el número de esporas es alto en suelos tanto ácidos como alcalinos lo que disminuye son los géneros, es decir, la capacidad de absorción y resistencia a cambios es baja comparada con suelos de pH neutro. (Crespo *et al.*, 2022).

En este orden de ideas, en relación con el pH presente en la zona de estudio y considerando los estudios previos mencionados, existe la posibilidad de que el pH puede seguir un patrón generalizado en su influencia sobre las poblaciones de hongos. Particularmente, parece que el número de esporas de hongos está más relacionado con la variación del pH dentro de un rango específico en cada cantidad determinada de suelo analizado. Esto se refleja claramente en la Figura 12, donde se observa que, a valores de pH más bajos, se encuentra un mayor número de esporas, mientras que, a valores de pH más altos, el número de esporas disminuye (Carrillo *et al.*, 2022).

7 Capítulo VII

7.1 Conclusiones.

- La alta riqueza de esporas de hongos micorrícicos arbusculares en la región de la Macarena enfatiza la importancia de implementar estrategias de conservación de suelos sostenibles. Estas estrategias pueden incluir prácticas agrícolas que fomenten la salud del suelo, como la agricultura de conservación y la reducción de la erosión, para mantener la diversidad de HMA y preservar la biodiversidad local.
- Los resultados de la investigación destacan la relevancia de un monitoreo e investigación continuos en la región de la Macarena. La diversidad de HMA y su impacto en la biodiversidad y la calidad del suelo subrayan la necesidad de estudios a largo plazo para comprender mejor cómo las prácticas agrícolas y ecológicas afectan a estos hongos y, por ende, a los ecosistemas locales. Esto proporcionaría una base sólida para la toma de decisiones informadas en la gestión sostenible de la tierra.
- Las esporas encontradas y extraídas en este estudio presentan un potencial enorme en la generación de bioinoculantes nativos que se pueden utilizar para el desarrollo de estrategias de conservación y mejora de la salud del suelo de la región de la Macarena.
- El análisis de esporas de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en las submuestras de bosque y pastizal en La Macarena-Meta reveló una destacada diversidad, identificando 36 morfoespecies clasificadas en tres órdenes taxonómicos. El género *Glomus* fue el más diverso, seguido por *Acaulospora*, indicando una complejidad en las interacciones simbióticas. Estos hallazgos resaltan la importancia de la diversidad de HMA en la ecología de los ecosistemas estudiados, sugiriendo implicaciones significativas para la salud del suelo y la estructura de la comunidad vegetal. La investigación subraya la

necesidad de comprender mejores estas interacciones para apoyar la conservación y sostenibilidad de la biodiversidad local en La Macarena-Meta.

- Los resultados sugieren que la influencia del pH en las poblaciones de hongos no sigue un patrón generalizado en la zona de estudio. En lugar de eso, el número de esporas parece estar más vinculado a la variación del pH dentro de rangos específicos en cada cantidad de suelo analizado. Los valores de pH más bajos hay un aumento en el número de esporas, mientras que, a valores de pH más altos, el número disminuye. Estos hallazgos subrayan la complejidad de las interacciones entre el pH del suelo y las comunidades fúngicas en la zona de estudio.

8 Capítulo VIII

8.1 Referencias

- Abarca, C. (2021). Comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares en talares del partido de magdalena, provincia de buenas aires: interacción con la invasión de *Ligustrum lucidum*.
- Acevedo, A. O., Sierra, M. M., & Gómez, J. E. (2017). Identificación de algunas cepas de hongos micorrícicos asociados al kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst ex Chiov) Morrone) y su efecto en algunas variables agronómicas.
- Alegre, J. C., Sánchez, Y., Pizarro, D. M., y Gómez, C. (2019). Manejo de los suelos con sistemas silvopastoriles en las regiones de Amazonas y San Martín. *Print: Lima, Peru*.
- Arancibia, R., Flores, M. E., Cabrera, T., Beiza, J. S., & Obando, J. (2022). Evaluación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la rehabilitación ecológica de ecosistemas con actividad minera. *Ecosistemas*, 31(2), 2304-2304.
- Arocha-Rodríguez, M. D. L. C., Pérez-Ortega, E., Fernández-Suárez, K., & Haesaert, G. (2019). Efecto del pH del medio de cultivo en el crecimiento presimbótico de *Rhizoglosum irregulare*. *Cultivos Tropicales*, 40(2).
- Bastida Rodríguez, M. (2022). La microbiota del suelo: micorrizas arbusculares y sus efectos en el viñedo.
- Beretta, Andrés, Bassahum, Daniel, & Musselli, Raquel. (2014). ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(2), 90-94. Recuperado en 19 de octubre de 2023, de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482014000200010&lng=es&tlng=es.
- Camargo Ricalde, S. L., ARIAS, N. M. M., MERA, C. J. D. L. R., y ARIAS, S. A. M. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Castro, K. V. M., & Roldán, T. M. (2022). Implementación del Acuerdo Final y los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial: ¿una reforma rural integral para los territorios?. *Revista Opera*, (30), 33-54.
- Chávez Rojas, P. E. (2020). Relación de comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares con diferentes coberturas vegetales de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá.
- Cheverría-Beirute, F., & Gatica-Arias, A. (2023). Evaluación de fuentes alternativas de resistencia genética hacia la roya del café (*Hemileia vastatrix*).
- Costa, V. A., Saavedra, O. M. P., Amador, A. C. H., Naranjo, A. M. L., & Hani, A. F. A. (2021). Actualización en la interpretación de la medición del pH e impedanciometría. *Revista colombiana de Gastroenterología*, 36(1), 73-80.
- Crespo-Flores, G. U. S. T. A. V. O., Ramírez-Tobias, H. M., Vallejo-Pérez, M. R., Méndez-Cortés, H. E. R. I. B. E. R. T. O., & González-Cañizares, P. J. (2022). Inoculación con rizobios y hongos micorrízicos arbusculares en plantas de *Leucaena leucocephala* en etapa de vivero y en sustrato con pH neutro. *Tropical Grasslands/Forrajes Tropicales*, 10(2).
- Cruz Higareda, J.B. (2014). Desarrollo de una trampa in situ para el Aislamiento Micorrízico de Una Orquídea Epífita del Parque Nacional el Tepozteco. (Trabajo de grado. Universidad Autónoma de México) Repositorio Institucional de la UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000711239
- Cuba, M. N. A., Santillán, S. M. T., Hurtado, G. P., Ordinola, S. A. P., & Mainegra, A. B. (2020). Caracterización de la colonización por micorrizas en *Retrophyllum rospigliossi* (Pilger) en el bosque Huamantanga, Perú. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(3), 535-549.
- Díaz, F. A., & Posada Téllez, F. C. (2021). Efecto de la deforestación sobre la temperatura de superficie en el parque nacional natural (PNN) Sierra la Macarena durante el periodo 2003-2019.
- Espinosa, N. (2003). Entre la justicia guerrillera y la justicia campesina; Un nuevo modelo de justicia comunitaria? La Macarena, Meta, estudio de caso. *Revista Colombiana de sociología*, (20), 117-145.
- Espinosa, N. (2010). *Política de vida y muerte: etnografía de la violencia diaria en la Sierra de la Macarena*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia.
- Espitia Ramírez, M., Acosta Saldaña, A. F., & Cano Perdomo, J. L. (2022). *Hongos formadores de micorrizas arbusculares nativos en la granja Agroecológica de UNIMINUTO, Villavicencio Meta* (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO).

- Flores, E; Miranda, M. & Villasis, M. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. Rev. alerg. Méx. [online]. 2017, vol.64, n.3, pp.364-370. ISSN 2448-9190.
- Forero Riaño, J. A., y Polanco Puerta, M. F. (2021). Análisis de la deforestación en La Macarena, antes y después de los acuerdos de paz. *Colombia forestal*, 24(2), 9-23.
- García, E., & Álvarez, E (2017). Evaluación de la población de micorrizas en parcelas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Altiplano central boliviano Evaluation of the population of mycorrhizas in potato plots (*Solanum tuberosum* L.) In the bolivian central altiplano.
- García-Giraldo, J. P. (2020). Implementación de los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial y construcción de paz territorial en Colombia: avances y desafíos. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 50(133), 454-481.
- Guerrero, D., & Acevedo, A. (2022). Cultivos de uso ilícito y procesos de transformación campesina en La Macarena (Meta, Colombia). *Agrociencia Uruguay*, 26(NSPE3).
- Gutiérrez, M. A., Carranza, C. F. C., y Vílchez, J. Q. (2007). Conflictos de uso del suelo y zonas ambientalmente críticas en la zona costera-marina de Lima metropolitana. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 10(20), 98-108.
- Hernández Beltrán, Á. D., y Monroy Díaz, M. (2019). *Caracterización de hongos micorrícicos arbusculares asociados a tres clones de cacao (theobroma cacao ml.) en el yopal (casanare), colombia* (Doctoral dissertation).
- Hernández, M. 2000. Las micorrizas arbusculares y las bacterias rizosféricas como complemento de la nutrición mineral de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.) [Tesis de maestría], Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, CU.
- Hidalgo, O. V., Nizama, P. C., y Torres, G. Y. (2021). IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD DE LA FRANJA COSTERA DE LIMA METROPOLITANA POR LA OCUPACIÓN DEL TERRITORIO: ANÁLISIS TIPOLOGICO DE CASOS. *Scientia*, 23(23), 145-160.
- Jaizme-Vega, M. C., Delamo, M. E., Domínguez, P. T., y Rodríguez-Romero, A. S. (2002). Efectos de la micorrización sobre el desarrollo de dos cultivares de platanera micropropagada. *InfoMusa*, 11(1), 25-8.
- Mañana, B., Covacevich, F., Rozas, H. R. S., Barbieri, P. A., & Commatteo, J. G. (2021). Encalado en suelos agrícolas acidificados de la región pampeana: efecto sobre actividad de hongos micorrícicos. *Ciencia del suelo*, 39(1), 20-38.
- Marín, M. A. M., Pescador, L. R., Ramos, L. R., y Charry, J. L. A. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Ingeniería y región*, 17, 1-12.
- Montealegre, M. (2023). Elaboración del inventario de la red vial terciaria para mejoramiento y priorización de recursos públicos en el municipio de La Macarena (Meta).
- Murgueitio, E. (2003). Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. *Livestock Research for Rural Development*, 15(10), 1-16.
- Naranjo, J., Mora-González, A., Oviedo-Anchundia, R., Naranjo-Torres, H., Flores-Cedeño, J., & Barcos-Arias, M. (2022). Estudio preliminar de micorrizas arbusculares presente en *Phytelephas aequatorialis* localizado en tres agroecosistemas costeros. *CIENCIA UNEMI*, 15(39), 65-75.
- Naranjo, J., Mora-González, A., Oviedo-Anchundia, R., Naranjo-Torres, H., Flores-Cedeño, J., Barcos-Arias, M. (2022). Estudio preliminar de micorrizas arbusculares presente en *Phytelephas aequatorialis* localizado en tres agroecosistemas costeros. *CIENCIA UNEMI*, 15(39), 65-75.
- Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y forrajes*, 32(2), 1-10.
- Ochoa, C. Y., Sanz, E. S., & Olmo, R. M. (2020). *Agricultura periurbana y planificación territorial: de la protección al proyecto agrourbano* (Vol. 22). Universitat de València.
- Oehl, F.; Sieverding, E.; Palenzuela, J.; Ineichen, K.; y Da Silva, G. 2011. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *Imafungus*. 2(2):191 - 199.
- Ortega, G. (2009). *Agroecología vs. Agricultura convencional*. Base Investigaciones Sociales. Asunción. FALTA LA EDITORIAL. ESTA MUY VIEJO.
- Pallares, A. M. (2020). Caracterización de Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA) asociados a la rizósfera de aguacate "Hass"(Persea americana).
- Peña Gómez, J. P. Deforestación en el municipio de Florencia, departamento de Caquetá, Colombia: un análisis de las dinámicas productivas y extractivas en el período 2000-2021.
- Peña-Venegas, C. P., Cardona, G. I., Arguelles, J. H., & Arcos, A. L. (2007). Micorrizas arbusculares del sur de la amazonia colombiana y su relación con algunos factores fisicoquímicos y biológicos del suelo. *Acta Amazónica*, 37, 327-336.

- Peña-Venegas, C. P., Cardona, G. I., Arguelles, J. H., & Arcos, A. L. (2007). Micorrizas arbusculares del sur de la amazonia colombiana y su relación con algunos factores fisicoquímicos y biológicos del suelo. *Acta Amazónica*, 37, 327-336.
- Pérez Moncada, U. A., Ramírez Gómez, M., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Wilches Ortiz, W. A., Ramírez, L., y Rengifo Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130.
- Pérez Sánchez, J. D. (2018). *Validación de las técnicas analíticas de alcalinidad, cloruros y pH de la EAAAM-ESP* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Pérez, A., Espitia, F., Núñez, A., & Jiménez, R. (2015). Diversidad de géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a pasto colosuaña (*Bothriochloa pertusa* (L) A. Camus) en suelos compactados y no compactados del municipio de San Marcos, Sucre-Colombia. *Revista colombiana de Ciencia Animal-recia*, 7(2), 185-190.
- Pérez, A., Rojas, J., Y Montes, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 3(2), 366-385.
- Pérez, A., y Vertel, M. (2010). Evaluación de la colonización de micorrizas arbusculares en pasto *Bothriochloa pertusa* (L) A. Camus. *Revista MVZ Córdoba*, 15(3), 2165-2174.
- Pérez, C., & Vertel, M. (2010). Evaluación de la colonización de micorrizas arbusculares en pasto *Bothriochloa*
- Puetate Mejía, L. M. (2019). *Alternativas de fertilización para el cultivo de la papa (Solanum tuberosum L.) con el empleo de micorrizas, microorganismos solubilizadores de fósforo y biol de producción local en El Ejido, Montúfar, Carchi* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica Estatal del Carchi).
- Raya Montaña, Y. A., Apéaz Barrios, P., Aguirre Paleo, S., Vargas Sandoval, M., Paz Da Silva, R., y Lara-Chávez, M. B. N. (2019). Identificación de hongos micorrizógenos arbusculares en huertos de aguacate de Uruapan, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(SPE23), 267-276
- Redecker, D.; Shübler, A.; Stockinger, H.; Stürmer, L.; Morton, J.; y Walker, C. 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23(7):515 - 531.
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., & Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44.
- Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Ramírez-Arrebató, M. Á., Rodríguez-Pedroso, A. T., y Falcón-Rodríguez, A. (2020). Efecto de ácidos húmicos, micorrizas y quitosano en indicadores del crecimiento de dos cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(3), 653-666.
- Riopedre-Galán, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., y Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4).
- Romero-Salazar, N.C., Galvis-Gratz, J.M. y Moreno-López, J. P. (2022). Hongos formadores de micorrizas aislados a partir de raíces de la orquídea *Rodriguezia granadensis* (LINDL.) RCHB. F. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 25 (1), e2086. Epub 15 de junio de 2022. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.2086>
- Saldaña, A. F. A., Perdomo, J. L. C., Ramírez, M. E., Medina, A. H., y Belalcázar, M. L. V. (2022). HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES NATIVOS EN LA GRANJA AGROECOLÓGICA DE UNIMINUTO, VILLAVICENCIO META. *Suelos Ecuatoriales*, 52(1y2), 13-30.
- Salgado García, S., Castelán Estrada, M., Jiménez Jerónimo, R., Gómez Leyva, J. F., & Osorio Miranda, M. (2014). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con caña de azúcar en la región de la Chontalpa, Tabasco. *Revista mexicana de micología*, 40, 7-16.
- Sánchez De P., Posada, R., Velázquez, D., y Narváez, M. (2010) Metodologías básicas para el trabajo con micorrizas arbusculares y hongos formadores de micorrizas arbusculares. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. (p. 139)
- Sanchez, de P., Gómez, L., Muñoz, F., Barrios, E., Prager, M., Bravo, O., El-Sharkawi, M., Pérez, S., Asakawa, N., Marmolejo, De la T., Cadavid, F., Quintero, D., Miranda, V., Mier, E., Torres, R., Reyes, T., Zapata, F., Tofiño, R., Benjumea, P., Diaz, G., ...et al Vargas, N. (2007). Las Endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira.
- Sandoval Ruiz, K. I., & García Rocha, N. D. L. O. (2019). Obtención de inoculantes puros de hongos micorrízicos arbusculares monospórico y consorcio en cultivo de *Brachiaria decumbens* como opción para la reducción de fertilizantes sintéticos en el departamento de Ucayali.
- Saparrat, M. C. N., Ruscitti, M. F., y Arango, M. C. (2020). Micorrizas arbusculares. *Libros de Cátedra*.

- Sarmiento, F. O., & Sarmiento, E. V. (2021). Flancos Andinos: Paleoecología, biogeografía crítica y ecología política en los climas cambiantes de los bosques neotropicales de montaña. *Editorial INDES_CES/UNTRM. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Amazonas. Chachapoyas, Peru.*
- Serna, D. R. (2003). Campesinos entre la selva, invasores de reservas. *Tabula Rasa*, (1), 183-210.
- Silva, H. D. D., y Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 2-14.
- Trejo, D., Hernández-Acosta, E., Baeza-Guzmán, Y., Pérez-Toledo, G., Morgado-Viveros, E., & Bañuelos, J. (2021). Efectividad de los hongos micorrízicos arbusculares introducidos y nativos en seis leguminosas coberteras. *Scientia fungorum*, 51.
- Vallejos-Torres, G., Sánchez, T., García, M. A., Trigoso, M., & Arévalo, L. A. (2019). Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra. *Acta Agronómica*, 68(4), 278-284.
- Vásconez, R. D. A., Moya, E. M. T., Jara, K. A. M., y Chiluisa-Utreras, V. P. (2020). Identificación molecular de cepas de *Bacillus* spp. y su uso como rizobacteria promotora del crecimiento en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 575-581.
- Verdugo Arranz, C. (2022). Micorrizas aplicadas en agricultura: una alternativa.
- Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolon, A. M., & Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 175-184.

Anexo 1.

Método utilizado para el conteo y medición de pH

Localidad / Zona	Promedio pH	pH	Repetición	N° esporas/100g suelo	Promedio N° Esporas
Bosque-Muestra 1	4,232	3,75	R1	12416	7797,3
		4,38	R2	8112,5	
		3,87	R3	8662	
		4,33	R4	5630	
		4,83	R5	4166	
Bosque-Muestra 2	3,774	3,92	R1	11790	10864,1
		3,72	R2	11016	
		3,86	R3	8728,5	
		3,83	R4	13640	
		3,54	R5	9146	
Bosque-Muestra 3	3,618	3,44	R1	16197	12603,9
		3,46	R2	15207,5	
		3,48	R3	10975,5	
		3,62	R4	10923	
		4,09	R5	9716,5	
Potrero-Muestra 4	5,602	6,34	R1	1940	6019,8
		4,37	R2	8004	
		5,77	R3	3249	
		5,23	R4	5844	

		,36	R5	11062	
Potrero- Muestra 5	6,77	,037	R1	8335	6063,4
		,687	R2	4627	
		,876	R3	9964	
		,436	R4	2798	
		,845	R5	4593	
Potrero- Muestra 6	5,65	,715	R1	4188	5423,2
		,825	R2	2484	
		,735	R3	4104	
		,635	R4	8845	
		,365	R5	7495	

Anexo 2 Datos brutos del conteo de número de esporas y resultados de la medición de pH para cada sub-muestra en los sitios de estudio. Autor 2023.