

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	María Angélica Rueda Rodríguez María Daniela Ortega Rodríguez		
FACULTAD	Ciencias Agrarias y del Ambiente		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Ambiental		
DIRECTOR	M.Sc. María Alejandra Vergel Bermúdez		
CODIRECTOR	Dr. Miguel Ángel García Parra		
TÍTULO DE LA TESIS	Caracterización de la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su potencial en la restauración ecológica de suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas		
TITULO EN INGLES	Characterization of the diversity of fungi with mycorrhizal capacity and their potential in the ecological restoration of soils in the Jorge Enrique Quintero Arenas Botanical Garden		
RESUMEN			
Este estudio caracterizó la diversidad de hongos micorrízicos y su potencial en la restauración de suelos en tres zonas del sendero peatonal del Jardín Botánico, mediante análisis químicos y microbiológicos. Se identificaron especies de los géneros <i>Glomus</i> , <i>Scutellospora</i> y <i>Acaulospora</i> , cuya capacidad para mejorar la absorción de nutrientes, la estructura del suelo y la resistencia vegetal fue evidenciada a través de una amplia revisión de la literatura científica.			
RESUMEN EN INGLES			
This study characterized the diversity of mycorrhizal fungi and their potential in soil restoration in three areas of the Botanical Garden's pedestrian path, through chemical and microbiological analyses. Species of the genera <i>Glomus</i> , <i>Scutellospora</i> and <i>Acaulospora</i> were identified, whose capacity to improve nutrient absorption, soil structure and plant resistance was evidenced through an extensive review of the scientific literature.			
PALABRAS CLAVES	Micorrizas, Restauración ecológica, Suelos, Diversidad, Jardín Botánico		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Mycorrhizae, Ecological restoration, Soils, Diversity, Botanical Garden		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 81	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:



**Caracterización de la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su
potencial en la restauración ecológica de suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique
Quintero Arenas**

María Daniela Ortega Rodríguez

María Angélica Rueda Rodríguez

Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula

Santander Ocaña

Ingeniería Ambiental

M.Sc. María Alejandra Vergel Bermúdez

Enero, 2025

Índice

Capítulo 1. Caracterización de la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su potencial en la restauración ecológica de suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.....	7
1.1 Planteamiento del Problema	7
1.2 Formulación del problema.....	9
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Justificación.....	10
1.5 Delimitaciones.....	12
1.5.1 Geográfica	12
1.5.2 Temporal	12
1.5.3 Conceptual.....	12
1.5.4 Operativa.....	13
Capítulo 2. Marco referencial.....	15
2.1 Marco Histórico.....	15
2.2 Marco Contextual	17
2.3 Marco Conceptual.....	17
2.4 Marco Teórico	19
2.5 Marco Legal	23
Capítulo 3. Diseño metodológico	25
3.1 Tipo de investigación.....	25
3.2 Población y muestra.....	27
3.2.1 Población.....	27

	3
3.2.2 Muestra.....	27
3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos	28
3.3.1 Identificación de las características químicas del suelo y su vegetación.	28
3.3.2 Determinación de la presencia de las micorrizas.	35
3.3.3 Incidencia de los hongos con capacidad micorrizogénica sobre los procesos de restauración de suelos.	38
Capítulo 4. Resultados.....	39
4.1 Identificación de las características químicas del suelo y su vegetación en tres zonas del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.	39
Características químicas.....	39
Inventario de la vegetación.....	41
4.2 Determinación de la presencia de hongos con capacidad micorrizogénica en el suelo del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.	49
Identificación de las especies micorrícicas encontradas en los suelos del jardín botánico.....	54
4.3 Análisis de la incidencia de los hongos con capacidad micorrizogénica sobre los procesos de restauración de suelos.....	59
Capítulo 5. Conclusión	62
Capítulo 6. Recomendaciones	63
Referencias	64
Apéndices	78

Lista de Tablas

Tabla 1. Marco Legal del proyecto.	23
Tabla 2. Método Potenciométrico para la determinación de el pH del suelo	31
Tabla 3. Método de Walkley y Black para determinar materia orgánica	32
Tabla 4. Determinación del P por el método de Bray y Kurtz N° 2.	33
Tabla 5. Formato para el inventario de la vegetación.	35
Tabla 6. Resultados del análisis químico del suelo.	39
Tabla 7. Inventario de la vegetación, Zona baja (8°14'17.0" N 73°19'11.0" W).....	41
Tabla 8. Inventario de la vegetación, Zona media (8°14'23.7" N 73°19'05.6" W).....	44
Tabla 9. Inventario de la vegetación, Zona alta (8°14'25.5" N 73°19'06.4" W).....	47
Tabla 10. Identificación de las especies micorrícicas.	54

Lista de Figuras

Figura 1. Puntos de muestreo, sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero...	26
Figura 2. Metodología para la recolección de muestras químicas y microbiológicas del suelo	28
Figura 3. Conteo de las esporas micorrízicas de la zona baja, media y alta del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.	50

Apéndices

Apéndice A. Evidencia fotográfica del procedimiento de delimitación y recolección de muestras químicas y microbiológicas en la zona baja, media y alta del sendero peatonal del Jardín Botánico.....	78
Apéndice B. Evidencia fotográfica del procedimiento para la determinación de la presencia e identificación de micorrizas.	80
Apéndice C. Informe analítico del Laboratorio Químico Ganacampo.....	82

Capítulo 1. Caracterización de la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su potencial en la restauración ecológica de suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas

1.1 Planteamiento del Problema

El acelerado crecimiento poblacional y las dinámicas económicas a nivel mundial han generado alteraciones en los ecosistemas, especialmente los que se vincula al recurso edáfico. El uso irracional del suelo provoca una modificación en sus características que puede resultar en la pérdida de su capacidad para cumplir con su función (Camacho, 2021). En Colombia, estas problemáticas se manifiestan en desafíos ambientales críticos como la contaminación, la deforestación y la pérdida de biodiversidad. Aunque la deforestación en 2023 disminuyó significativamente a 79.256 hectáreas, la cifra más baja en 23 años, este fenómeno continúa siendo una amenaza crítica para los bosques, además la pérdida de cobertura forestal afecta directamente la biodiversidad del país, con más de 2.190 especies de plantas y 503 animales amenazados, y contribuye significativamente al cambio climático al liberar gases de efecto invernadero derivados del cambio en el uso del suelo (World Wildlife Fund, 2024). A estas problemáticas se suman la erosión y la degradación del suelo, que agravan aún más el panorama, cerca del 40% del territorio nacional sufre algún grado de erosión, y el 3% de esta superficie está catalogada como severamente erosionada y la salinización afecta aproximadamente al 45% del territorio, amenazando la productividad agrícola y los servicios ecosistémicos asociados (IDEAM, 2019).

Estos fenómenos no solo han alterado las características físicas y químicas del suelo, sino también los atributos de la biota edáfica, afectando los ciclos naturales de elementos esenciales

como el fósforo, el carbono y el nitrógeno. Dichas alteraciones están relacionadas con la pérdida de microorganismos clave, como hongos y bacterias, por lo que se han alterado procesos fundamentales como la solubilización de fósforo, la fijación biológica de nitrógeno y la mineralización, procesos esenciales para mantener la fertilidad y estabilidad del suelo (Camargo-Ricalde, 2012).

Estudios recientes han demostrado que la composición de las comunidades microbianas del suelo es fundamental para funciones regulares ecosistémicas, incluyendo la capacidad de los suelos para almacenar carbono y reciclar nutrientes. Los cambios en estas comunidades, provocados por factores como la contaminación, el cambio de uso del suelo y el cambio climático, pueden alterar la emisión de dióxido de carbono y la disponibilidad de nitrógeno en los ecosistemas terrestres, se ha comprobado que estos microorganismos no solo son esenciales para la productividad vegetal, sino también para mantener la estructura y la resiliencia del suelo frente a factores de estrés (Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2016).

La diversidad funcional de las comunidades microbianas es particularmente importante para la formación de agregados estables en el suelo, los cuales son necesarios para su estructura física y su capacidad de retener agua y nutrientes. Sin embargo, investigaciones han señalado que la actividad de estos microorganismos depende de múltiples factores, incluyendo el tipo de vegetación y las condiciones ambientales, lo que subraya la necesidad de estudios detallados para comprender las interacciones entre plantas, suelo y microorganismos (Cerón Rincón & Aristizábal Gutiérrez, 2012).

En este contexto, el Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas, de la Universidad Francisco de Paula Santander en su seccional de Ocaña, representa un espacio de alto valor ecológico que alberga una amplia diversidad de especies vegetales con importancia económica,

científica y conservacionista. Este jardín no solo actúa como un refugio para la biodiversidad regional, sino también como un laboratorio natural que ofrece oportunidades únicas para investigar las interacciones planta-suelo-microorganismo en un ecosistema particular de bosque seco premontano, un bioma altamente amenazado en Colombia. Por ello a pesar de su potencial estratégico, se carece de información detallada sobre la diversidad y funcionalidad de los microorganismos presentes en los suelos del Jardín Botánico, especialmente de los hongos con capacidad micorrizogénica, así como su importancia y potencial dentro de la zona, a fin de contribuir a la conservación de la biodiversidad.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su potencial de restauración de suelos en tres zonas del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterización de la diversidad de hongos con capacidad micorrizogénica y su potencial para la restauración ecológica de suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero A G5TJETQq0.000009122

(Céspedes, 2023). Gracias a estos beneficios, las micorrizas se consideran un componente clave en la recuperación y restauración de ecosistemas degradados. Su incorporación a los suelos se ha convertido en una práctica recurrente, pues estos microorganismos desempeñan una función ecológica vital, contribuyen a la formación, manejo y conservación de suelos, promoviendo su fertilidad y facilitando la regeneración de ecosistemas degradados (Fajardo et al., 2011). La restauración ecológica de suelos en entornos como el jardín botánico adquiere especial relevancia ya que permite preservar la biodiversidad y garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas.

En este contexto, es fundamental conocer la variedad de especies micorrícicas presentes en los suelos del jardín botánico, ya que la actividad biológica de estos hongos puede variar según su preferencia de colonización, el tipo de vegetación con la que desarrollan simbiosis, y las características físicas y químicas de los suelos, así como el estatus hídrico en el que sobreviven (Gonzalez et al., 2011). La determinación de la diversidad de hongos micorrícicos en el sendero peatonal del jardín botánico de la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña, no solo permitirá comprender mejor las interacciones entre estos hongos y las plantas en este ecosistema específico, sino que proporcionará una base sólida para futuras investigaciones en micorrizas. Este conocimiento es crucial para implementar prácticas que promuevan la sostenibilidad en la agricultura y la reforestación, aportando directamente a la conservación de suelos y al desarrollo de estrategias para mejorar la salud del ecosistema en la región de Ocaña.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Geográfica

El proyecto se llevó a cabo en el sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, ubicado en el municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander, Colombia. Los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio de Biotecnología vegetal y el laboratorio de suelos, así como del apoyo del herbario de la Universidad.

1.5.2 Temporal

El proyecto “Diversidad de hongos micorrizógenos en suelos del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas” se desarrolló durante un período de cuatro meses, con el propósito de implementar las actividades necesarias para alcanzar los objetivos establecidos.

1.5.3 Conceptual

Micorriza. Las micorrizas son asociaciones simbióticas y mutualistas que se establecen entre las raíces de las plantas terrestres y determinados hongos del suelo. Estas relaciones favorecen la absorción y asimilación de nutrientes, especialmente minerales como fósforo, calcio, potasio y nitrógeno (Acosta, 2020).

Suelo. El suelo es un medio poroso, biológicamente activo, estructurado y está desarrollado en la superficie de la Tierra. El suelo incluye aquellos materiales superficiales de la geosfera (parte sólida del planeta) biológicamente activos. Se diferencia de las rocas en que este incluye materia inorgánica (mineral, agua, gases) y orgánica (humus) que se están transformando, lo que da lugar a su estructuración y organización en horizontes (Astillero, 2019).

Conservación ambiental. La conservación ambiental es la acción de la humanidad para cuidar, proteger y mantener todos los elementos de la naturaleza como la propia existencia de los seres humanos, la fauna, la flora, los parques y reservas naturales (Pineda, 2017).

Biodiversidad. Término por el que se hace referencia a la amplia variedad de seres vivos sobre la tierra y los patrones naturales que conforman, resultado de miles de millones de años de evolución según procesos naturales y también de la influencia creciente de las actividades del ser humano. (Fondo Mundial para la naturaleza , 2021)

Jardín botánico. Los jardines botánicos son colecciones de especies vegetales vivas, en forma de museos vivos que albergan diferentes tipos de flora. Estas colecciones son especializadas, puesto, que se conoce la procedencia de las plantas que ahí se encuentran, usos y taxonomía, ayudando a la conservación de especies vegetales en peligro de extinción, acompañada de la labor de propagación y reinserción en el medio natural (Osorio, 2023).

1.5.4 Operativa

- El estudio se llevó a cabo en el sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas de la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña.
- Se estableció un plan de muestreo que incluyó la cantidad y ubicación específica de las muestras.
- La recolección de muestras de suelo se realizó en tres áreas representativas del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas y se seleccionaron zonas estratégicas que abarcaran diferentes tipos de vegetación y condiciones edáficas.
- Las muestras de suelo fueron analizadas en Laboratorio de Biotecnología vegetal y Laboratorio de Suelos Agrícolas.

- El análisis integró la diversidad y abundancia de los hongos con capacidad micorrizogénica de las zonas de estudio.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1 Marco Histórico

El termino Micorriza fue propuesto por el botánico alemán Albert Bernard Frank, en el año 1885, que literalmente significa “hongo-raíz”, para definir las asociaciones simbióticas, mutualistas y no patógenas que se generaban entre las raíces de las plantas y los micelios de los hongos, en las que ambos resultan beneficiados, los estudios del botánico despertaron el interés mundial por los hongos presentes en las raíces de las plantas (Honrubia, 2009).

En 1900, el botánico francés Bernard descubrió su importancia estudiando las orquídeas, para el año 1910 comenzó a extenderse su estudio en las plantas utilizadas en agricultura y jardinería. Sin embargo, fue a partir de los estudios de Mosse en Inglaterra en el año 1955 que se empezó a comprender la relevancia y la amplia aplicación de esta simbiosis, atrayendo así el interés de otros investigadores (Camargo et al., 2012).

Durante esa época se descubrieron diferentes tipos de micorrizas que se clasifican según las estructuras que el hongo forma dentro de la raíz, como las ectomicorrizas, las endomicorrizas y las ectendomicorrizas cada una asociada a grupos específicos de hongos y plantas. El estudio de los diferentes tipos de micorrizas comenzó a desarrollarse y consolidarse principalmente en la primera mitad del siglo XX (Kamaruzaman & Othman, 2010).

Sin embargo, los numerosos descubrimientos fósiles, en los que se han encontrado micorrizas llamadas fósiles endomicorriales, han permitido establecer que el origen y presencia de las micorrizas son sumamente antiguos. Se han llegado a encontrar esporas de Glomeromycota en estratos con una antigüedad de hasta 460 millones de años, De igual manera, se ha brindado evidencia clara para suponer que las especies de hongos micorrízicos divergieron

desde el periodo Devónico, al encontrar fósiles con estructuras morfológicas similares a las que se observan en las especies existentes en la actualidad. Además, las formas arbusculares ya se encontraban ampliamente distribuidas en el momento de la aparición de las primeras plantas terrestres en el registro fósil, hace unos 400 millones de años, lo que sugiere que este tipo de asociaciones han podido ser esenciales para permitir la colonización terrestre de las plantas (Salmerón et al., 2015).

Por otra parte, en los últimos años el estudio de los hongos con capacidad micorrizogénica ha aumentado considerablemente, ya que su aplicación puede ser utilizada como una técnica para promover el crecimiento y floración de plantas y árboles de forma biológica, natural y ecológica. El potencial de manejo de la micorriza en procesos de restauración ecológica a ha sido demostrado por numerosos trabajos realizados bajo condiciones de campo e invernadero, en países como México, se realizó una revisión de aspectos generales del manejo de la simbiosis micorrízica de especies nativas, con el fin de usarlas como una herramienta potencial para la recuperación de suelos (Saucedo et al., 2022). En Colombia, (Garzón, 2015) destaca la importancia de las micorrizas arbusculares (MA) como una herramienta clave para promover el manejo ecológico de la agricultura en la Amazonia, destacando su gran potencial para promover prácticas sostenibles en la región.

Otros estudios (Asmelash et al., 2016; Barea et al., 2002; Allen et al., 2003; Al-Karaki, 2013) han analizado la función de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) en la restauración ecológica, destacando su contribución al ciclo de nutrientes, el mejoramiento de las propiedades del suelo y la resistencia de las plantas a diversas adversidades.

2.2 Marco Contextual

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el municipio de Ocaña, ubicado en la zona occidental del departamento de Norte de Santander sobre la cordillera Oriental, fundada el 14 de diciembre de 1970 por Francisco Fernández de Contreras. Su extensión territorial es de 463,00 km², que representa el 2,2% del departamento y una altitud entre 400 a 2600 m.s.n.m. (Alcaldía Municipal de Ocaña Norte de Santander , 2020).

El proyecto se enmarcó dentro del ámbito académico de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña, situada en el sector nororiental del país, específicamente a 2,8 Km del casco urbano de la ciudad de Ocaña, en el departamento Norte de Santander, con una extensión de 105 Hectáreas, cuenta con tres sedes la principal conocida como la Granja o Sede Algodonal ubicada en la vereda el Rhin, Vía Acolsure, la segunda sede la Primavera, en la zona residencial del casco urbano, en ella se ubican en su gran mayoría los diferentes laboratorios que soportan los programas y la sede de Bellas Artes, donde se rescata el valor cultural de la provincia de Ocaña (Sánchez et al., 2014).

Este estudio, dirigido desde la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente de la Universidad Francisco de Paula Santander, tuvo como área de influencia directa, la zona correspondiente al sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas, un espacio clave para la investigación sobre biodiversidad, conservación y restauración ecológica.

2.3 Marco Conceptual

Ecología. La ecología es una rama científica que se enfoca en examinar y comprender la relación entre los organismos vivos y su entorno, que se define como la interacción de factores

bióticos y abióticos. Esta disciplina es considerada multidisciplinaria debido a su integración con otras áreas del conocimiento, tales como la climatología, la biología y la ética (Pérez Porto & Gardey, 2005).

Restauración ecológica. La restauración ecológica es el proceso mediante el cual se busca devolver un ecosistema afectado o deteriorado a su estado original o a una condición comparable, enfocándose en restaurar los elementos esenciales de su estructura, función y composición. El objetivo de este proceso es recuperar, con ayuda humana, las dinámicas naturales de los ecosistemas nativos o históricos de una región, para asegurar su resiliencia y sostenibilidad a largo plazo (Vargas, 2007).

Biodiversidad fúngica. La biodiversidad fúngica hace referencia a la diversidad y abundancia de especies de hongos presentes en un determinado ecosistema. Incluye tanto hongos microscópicos como macroscópicos, que desempeñan funciones cruciales en los ecosistemas, como la descomposición de materia orgánica y formación de simbiosis con las plantas, lo que les permite explorar un mayor volumen de suelo para absorber agua y nutrientes; los hongos patógenos juegan un papel en la regulación de las poblaciones de plantas (Escudero, 2022).

Interacciones Planta-Hongo-Suelo. La interacción entre planta, hongo y suelo representa una relación simbiótica clave en los ecosistemas terrestres, destacando la asociación micorrízica como una de las más significativas. Desde su colonización del medio terrestre, las plantas han evolucionado diversas estrategias para superar los retos bióticos y abióticos, siendo una de las más destacadas la habilidad de sus raíces para formar relaciones mutualistas con los

microorganismos presentes en el suelo (Camarena-Gutiérrez, 2011). En esta simbiosis, los hongos micorrízicos colonizan las raíces de las plantas, formando estructuras especializadas que benefician a ambas partes: el hongo obtiene carbohidratos y un hábitat estable, mientras que la planta mejora su capacidad de absorción de nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, y de agua desde el suelo. Además, esta asociación aumenta la resistencia de las raíces a patógenos y contribuye a la exploración eficiente de los recursos minerales disponibles (Universidad de Costa Rica, 2013). Esta relación no solo asegura el crecimiento y la supervivencia de las plantas en condiciones adversas, sino que también juega un papel esencial en la salud y fertilidad del suelo, promoviendo la sostenibilidad de los ecosistemas. La interacción planta-hongo-suelo, facilitada por las micorrizas, es un ejemplo destacado de cómo las interconexiones biológicas moldean la dinámica y funcionalidad de los entornos naturales (DUPO, 2022).

2.4 Marco Teórico

Las micorrizas son asociaciones simbióticas y mutualistas entre las raíces de las plantas terrestres y hongos del suelo, consideradas esenciales para la salud de los ecosistemas y el desarrollo de las plantas. Descubiertas en 1885 por Albert Bernhard Frank, quien acuñó el término, estas relaciones se basan en el intercambio de recursos: los hongos facilitan la absorción de agua y nutrientes como fósforo y nitrógeno, mientras que las plantas proporcionan carbohidratos derivados de la fotosíntesis. Se estima que más del 90% de las plantas terrestres tienen micorrizas, y esta interacción es fundamental para su crecimiento y supervivencia, especialmente en suelos pobres o degradados. El proceso de micorrización, ya sea natural o inducido, involucra la colonización de las raíces mediante inoculantes a base de esporas o micelio, promoviendo una relación simbiótica altamente eficiente (Moore et al., 2019).

Las micorrizas se clasifican principalmente en ectomicorrizas y endomicorrizas. Las primeras forman un manto externo de hifas sobre las raíces y están asociadas principalmente con árboles de climas templados, como los de las familias Pinaceae y Fagaceae. Por otro lado, las endomicorrizas, también conocidas como micorrizas arbusculares (MVA), son las más comunes y penetran en el córtex de las raíces, formando estructuras especializadas como arbúsculos y vesículas que facilitan el intercambio de nutrientes. Existen también variantes más específicas, como las micorrizas orquidoides, indispensables para las orquídeas debido a su incapacidad para obtener nutrientes de forma independiente en ciertas etapas de su vida, y las ericoides, que ayudan a plantas de suelos ácidos y pobres en nutrientes, como las ericáceas (Acosta, 2021). El papel de las micorrizas trasciende el ámbito individual de las plantas, ya que contribuye significativamente a la salud del suelo, mejorando su estructura, promoviendo la biodiversidad y facilitando la regeneración de ecosistemas degradados. En agricultura, su uso permite una fertilización más eficiente y sostenible, reduciendo la dependencia de productos químicos y mejorando la resistencia de los cultivos a factores de estrés como sequías, plagas y enfermedades. Estas asociaciones también forman redes subterráneas que conectan plantas entre sí, favoreciendo la transferencia de nutrientes y la comunicación, lo que resalta su importancia en la dinámica de los ecosistemas terrestres (González, 2013).

Importancia ecológica de las micorrizas

Las micorrizas son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, ya que mejoran significativamente el acceso de las plantas a nutrientes clave como el fósforo y el nitrógeno, especialmente en suelos pobres o degradados. Además, juegan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático al capturar carbono del aire y almacenarlo en el suelo. Los hongos micorrícicos arbusculares y ectomicorrícicos facilitan este proceso mediante la

transferencia de carbono desde las plantas hacia el suelo, creando biomasa fúngica que actúa como un reservorio estable de carbono (Bayón, 2022).

Ademas, un estudio de Soudzilovskaia et al. (2019) sobre la distribución global de las asociaciones micorrícicas revelan que las micorrizas arbusculares están presentes en más del 80% de las especies de plantas terrestres, este trabajo, publicado en *Nature Communications* , muestra cómo las plantas que están asociadas a distintos tipos de micorrizas, como las arbusculares y las ectomicorrícicas, almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa y en los suelos, jugando un papel crucial en la biodiversidad y en la resistencia de los ecosistemas frente a perturbaciones como el cambio climático, asimismo las micorrizas no solo fortalecen la resiliencia de las plantas ante condiciones adversas, sino que también contribuyen a la estabilidad de los ecosistemas, haciendo de estos hongos una herramienta natural invaluable en la lucha contra la degradación ambiental y el calentamiento global.

Sobre qué plantas se establecen las micorrizas

Las asociaciones micorrícicas son comunes en una amplia gama de plantas vasculares, y aunque existen algunas excepciones, como las familias Brassicaceae (Crucíferas), Chenopodiaceae, Cyperaceae, Caryophyllaceae, Juncaceae y Proteaceae, esto debido a características biológicas específicas puesto que algunas de estas plantas producen compuestos que inhiben la colonización de sus raíces por hongos micorrícicos o tienen mecanismos alternativos para obtener nutrientes, como asociaciones con bacterias simbióticas y además, algunas están adaptadas a suelos con baja disponibilidad de fósforo, desarrollando estrategias como la exudación de compuestos orgánicos, lo que reemplaza la función de las micorrizas (Kumari et al., 2024).

Las asociaciones micorrícicas también se han observado en briofitas y pteridofitas, aunque la información sobre estas simbiosis en plantas no vasculares sigue siendo limitada. Entre las plantas vasculares que se benefician de estas relaciones simbióticas se encuentran especies lechosas de gran importancia forestal (como las Fagáceas, Betuláceas y Pináceas), especies hortícolas clave (como las Solanáceas y Gramíneas) y numerosas familias de plantas ornamentales (como las Orchidaceae y Rosáceas). Estas asociaciones son esenciales no solo para el desarrollo y bienestar de las plantas, sino también por su importancia ecológica y económica, ya que optimizan la absorción de nutrientes y refuerzan la resistencia de las plantas frente a condiciones desfavorables. (Grupo Técnico Sobiotech S.A.S)

¿Cómo se produce la colonización?

El proceso de colonización micorrícica comienza cuando los hongos micorrícicos detectan sustancias exudadas por las raíces de las plantas, estas sustancias actúan como señales que inducen el crecimiento del micelio fúngico, dirigiéndolo hacia la raíz de la planta mediante un fenómeno conocido como biotropismo positivo, una vez que el micelio se aproxima a la raíz, se forma una estructura llamada apresorio, que permite el contacto directo, después de este contacto inicial, se producen cambios morfológicos tanto en el hongo como en la planta. En el hongo, la pared celular se adapta para facilitar la penetración en las células de la raíz y la formación de una estructura especializada conocida como arbúsculo, que es el sitio de intercambio de nutrientes, en la planta, las células de la raíz también modifican su organización para permitir la integración del hongo, creando un ambiente adecuado para el intercambio de carbono, agua y nutrientes esenciales. (López Encina & Barceló Muñoz, 2020)

Una vez establecida la simbiosis, ambos organismos comienzan a compartir recursos, las plantas proporcionan carbono obtenido a través de la fotosíntesis, mientras que los hongos

facilitan la absorción de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y otros minerales esenciales que son más difíciles de captar por las raíces de la planta. Este intercambio mejora la salud y la resistencia de la planta, al mismo tiempo que optimiza la eficiencia metabólica de ambos simbioses, favoreciendo su desarrollo y adaptación a diversas condiciones ambientales (Gadkar et al., 2001).

2.5 Marco Legal

A continuación (Tabla 1) se presentan los decretos y leyes que se consideran relevantes para la implementación de proyectos relacionados con la caracterización de los hongos con capacidad micorrizogénica y con potencial en la restauración ecológica de suelos.

Tabla 1.

Marco Legal del proyecto.

Marco Legal	
Norma	Comentario
Ley 99 de 1993	“por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.”

Marco Legal	
Norma	Comentario
Ley 165 de 1994	"Por medio de la cual se aprueba el "Convenio sobre la Diversidad Biológica", hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992". Artículo 12. Investigación y capacitación. Las Partes Contratantes, teniendo en cuenta las necesidades especiales de los países en desarrollo: (...) b. Promoverán y fomentarán la investigación que contribuya a la conservación y a la utilización sostenible de la diversidad biológica, particularmente en los países en desarrollo, entre otras cosas, de conformidad con las decisiones adoptadas por la conferencia de las Partes a raíz de las recomendaciones del órgano subsidiario de asesoramiento científico, técnico y tecnológico.
Decreto 1076 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible” Artículo 2.2.7B.1.1.3. Definiciones. Para efectos de la aplicación del presente capítulo, se adoptan y adaptan las siguientes definiciones: (...) 2. Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE): Representan un sistema de garantía de calidad relativo al modo de organización de los estudios de seguridad no clínicos referentes a la salud y el ambiente y a las condiciones en que estos estudios se planifican, ejecutan, controlan, registran, archivan e informan.

Fuente. Elaboración propia.

Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se llevó a cabo en este trabajo de grado es principalmente de carácter descriptivo y exploratorio, con el objetivo de profundizar en el estudio de la diversidad de hongos micorrizogénicos y su potencial de aplicación en la restauración ecológica de suelos. En una primera fase, se llevó a cabo una revisión de la literatura existente, con el fin de compilar información relevante sobre las especies de hongos micorrízicos y su papel en los procesos de restauración y mejora de suelos degradados.

Luego, se realizó un proceso de recolección de datos mediante el muestreo de suelos en el Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas y el aislamiento de hongos micorrizogénicos presentes en estas muestras. Este enfoque permitió explorar la diversidad de hongos en el área de estudio y describir sus características morfológicas.

Para llevar a cabo este estudio, se han seleccionado tres áreas específicas dentro de lo que corresponde al sendero peatonal del mismo, cuyas ubicaciones y representaciones gráficas se detallarán a continuación en la figura 1.

Figura 1.

Puntos de muestreo, sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero.



Fuente. Elaboración propia, con ayuda de la herramienta Qgis.

3.2 Población y muestra.

3.2.1 Población

Para este estudio, la población de interés fue el suelo del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas, donde se seleccionaron tres áreas específicas, la zona baja con coordenadas ($8^{\circ}14'17.0''$ N $73^{\circ}19'11.0''$ W), la zona media con coordenadas ($8^{\circ}14'23.7''$ N $73^{\circ}19'05.6''$ W), la zona alta con coordenadas ($8^{\circ}14'25.5''$ N $73^{\circ}19'06.4''$ W), las áreas se seleccionaron estratégicamente para representar diferentes condiciones ambientales y de cobertura vegetal presentes en el jardín. La población total de suelos en estas tres áreas servirá como el conjunto de referencia para el proceso de muestreo y análisis de hongos micorrizogénicos.

3.2.2 Muestra

Para este estudio, se seleccionaron muestras representativas de suelos de las tres áreas específicas dentro del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas previamente identificadas.

3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos

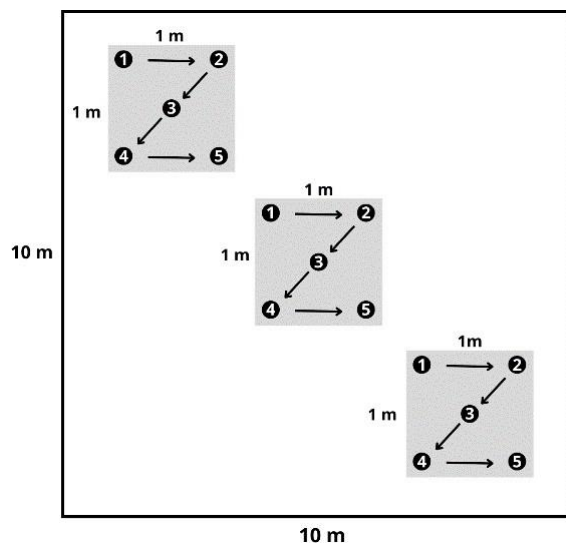
3.3.1 Identificación de las características químicas del suelo y su vegetación.

3.3.1.1 Métodos de muestreo químico y microbiológico del suelo. Para llevar a cabo el análisis químico y microbiológico del suelo, seguimos los métodos de muestreo descritos en el libro de Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Por lo tanto, la metodología para la recolección de muestras que se empleó para la toma de muestras químicas y microbiológicas es la siguiente: Se tomó un área de 10 m² por cada una de las tres áreas previamente mencionadas del sendero peatonal en el Jardín Botánico: la zona baja, media y alta. Cada una de estas áreas se dividió en tres subáreas de 1 m², y dentro de cada subárea se tomaron 5 submuestras empleando la técnica de muestreo en zig-zag. Estas submuestras se combinaron en una sola muestra de 1 kg de suelo por cada subárea, tal como se ilustra en la figura 2.

Figura 2.

Metodología para la recolección de muestras químicas y microbiológicas del suelo.



Fuente. Elaboración propia.

Procedimiento químico:

- En la zona baja, media y alta del sendero peatonal del Jardín Botánico se seleccionaron áreas de 10 m².
- Cada área de 10 m² se dividió en tres subáreas de 1 m² en forma diagonal.
- Se quitó totalmente la vegetación que cubre el suelo en cada zona.
- Con una pala, se realizaron 5 hoyos en forma de zig-zag en cada una de las subáreas seleccionadas (1 m²). El hoyo se realizó de 20 cm de lado y de 30 cm de profundidad.
- Con la ayuda de una pala pequeña se tomaron muestras de cada una de las paredes de los hoyos de abajo hacia arriba.
- Se mezcla en un papel o en un recipiente limpio, las 5 submuestras obtenidas de cada subárea de 1 m², por lo que se obtuvieron 3 muestras compuestas, que constituyen la muestra representativa por cada zona (zona baja, zona media y zona alta).
- Por cada subárea se tomó un kilogramo de suelo, se empaca y etiqueta con su respectivo número y ubicación.
- Las muestras se llevaron al laboratorio de Suelos Agrícolas y al laboratorio de Aguas de la universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.

Procedimiento microbiológico

La recolección de las muestras para análisis microbiano se realizó retirando la hojarasca, se abrió un agujero de 20 cm de profundidad y de las paredes del mismo se tomó con ayuda de un palín suelo representativo, teniendo cuidado de recoger una cantidad similar para cada submuestra. Entre extracciones se hizo el lavado de las herramientas. La mezcla de las submuestras se realizó en una bolsa y luego se revolió adecuadamente, se tomaron

aproximadamente 500 g de suelo y se almacenó en una bolsa de polietileno a la que se le han abierto algunos agujeros con la ayuda de una perforadora, se selló la muestra con ayuda de cinta y se etiquetará con letra clara, teniendo en cuenta la parcela y la muestra que representa.

3.3.1.2 Análisis químico del suelo. Se realizó un análisis de pH, materia orgánica y fósforo, además de un inventario de la vegetación presente en cada área de estudio.

Se detalla a continuación los procedimientos que se llevaron a cabo para la preparación de la muestra antes del análisis:

El pH del suelo. Para llevar a cabo el análisis químico del suelo, seguimos la metodología descrita en el manual de laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) por Ignacio Federico Carrillo Pachón, publicado en 1985. Con base en el manual se realizó la determinación del pH utilizando el Método Potenciométrico, como se describe en Tabla 2.

Tabla 2.*Método Potenciométrico para la determinación de el pH del suelo.*

Determinación de pH del suelo		
Equipo	Materiales	Procedimiento
Potenciometro Metrohm E520, provisto de electrodo combinado para leer en el rango de pH 1 a 13.	- Un frasco de 100 ml para cada muestra. - Una varilla de madera de unos 10 cm de largo para cada muestra con el objeto de agitar la solución.	- Colocar 25 ml de suelo seco y preparado - Adicionar 25 ml de agua estilada con el dispensador y agitar con ayuda de una varilla, aproximadamente cada 15 minutos.
Reactivos		
- Soluciones tampón de referencia para estandarizar el potenciómetro. Será suficiente soluciones de pH 3,0 - 4,0 - 7,0 y 9,0. Deben prepararse cada dos meses y guardar en nevera. - Soluciones tampones de trabajo. Envasadas en frascos plásticos de 50 ml aproximadamente. Cambiarlas semanalmente.	- Un frasco lavador para el lavado del electrodo después de cada lectura. - Dispensador de 25 ml. - Medida para 25 g, aproximadamente, de suelo seco.	- Después de una hora de reparada la suspensión, leer el pH directamente en el potenciómetro. - Lavar y enjuagar los electrodos al terminar cada lectura.

Fuente. Información tomada del Manual de laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) (Pachón, 1985).

Materia orgánica. Para determinar de la materia orgánica se empleó el método de Método de Walkley y Black para materia orgánica.

Tabla 3.

Método de Walkley y Black para determinar materia orgánica.

Determinación de Materia Orgánica	
Materiales y equipos	Procedimiento
- Un erlenmeyer de 500 ml por cada muestra. - Una pipeta volumétrica de 10 ml. - Una pipeta graduada de 1 ml. - Una bureta de 25 ml. - Un dispensador de 10 ml para el ácido fosfórico. - Un dispensador de 20 ml para el ácido sulfúrico. - Un beaker con señal en 150 ml para el agua. - Balanza analítica Mettler H35. - Mesa de trabajo con superficie aislante del calor. - Estufa controlada a 105 ± 5 °C.	- Colocar en el erlenmeyer de 500 ml 0,3 g de suelo seco. Llevar dos erlenmeyer sin muestra de suelo que servirán como blancos: blanco reactivo blanco tanda. - Adicionar 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ 1N con pipeta volumétrica. Agitar. - Añadir 20 ml de H_2SO_4 concentrado. Agitar fuertemente por un minuto. - Dejar reposar durante media hora. - Agregar 150 ml de agua. - Agregar 10 ml de H_3PO_4 al 85% y 0,5 ml de indicador.
Reactivos	- Titular los blancos con solución ferrosa para conocer la normalidad del sulfato ferroso. El punto final está dado por el paso de un color azul a un verde brillante (Rosa a verde cuando se usa O-fenantrolina)
1. H_3PO_4 al 85% grado analítico (G.A.). 2. H_3PO_4 grado técnico (G.T.). 3. H_2SO_4 G.A. concentrado. 4. H_2SO_4 G.T. Para análisis de rutina. 5. Solución 1N de $K_2Cr_2O_7$. 6. Solución indicadora: Difenilaminosulfonato de bario. 7. Solución 0,5N de sulfato ferroso.	

Fuente. Información tomada del Manual de laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) (Pachón, 1985).

El Fósforo. Para la determinación de los fosfatos del suelo se empleó el método de Bray y Kurtz N°2.

El fósforo que pasa a solución en solución extractora de HCl 0,1N más NH_4F 0,03N se determina como fosfato, colorimétricamente. Los fosfatos, con el molibdato de amonio y el tartrato de potasio y antimonio, desarrollan un color azul al reducirse con ácido ascórbico. Este color se mide en un espectrofotómetro a 660 nm. Se elabora una gráfica de As vs. Concentración con valores de fosfato conocido.

Tabla 4.

Determinación del P por el método de Bray y Kurtz N° 2.

Determinación de fósforo	
Materiales y equipos	Reactivos
- Balanza analítica, Mettler - H35. - Tubos de ensayo de 50 ml/muestra. - Tapones de caucho N°4/muestra. - Cronometro. - Embudos de vidrio analíticos, caña larga, diámetro 8,9 cm/muestra. - Papel filtro Whatman N° 42. Diámetro 11,5 cm. - Dispensador de 20 ml. - Frascos plásticos de 50 ml/muestra. - Pipeta volumétrica de 2 ml/muestra. - Pipeta volumétrica de 10 ml. - Pipeta volumétrica de 25 ml/muestra. - Erlenmeyer de 125 ml/muestra. - Dispensador automático graduable de 10 ml. - Espectrofotómetro Zeiss PM 2A. - 4 frascos volumétricos de 1 litro. - 8 frascos volumétricos de 250 ml, para los patrones.	1. Ácido clorhídrico 4N: Tomar 500 ml de ácido clorhídrico concentrado (12N, D = 1,18) y adicionar un litro de agua. 2. Solución extractora: (HCl 0,1N + NH_4F 0,03N). Disolver 1,11 gramos de NH_4F* y 25,0 ml de HCl 4N en agua y llevar a 1 litro. Guardar en frasco oscuro y plástico. 3. Solución A: Disolver 60 gramos de molibdato de amonio $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en 200 ml de agua. Añadir 1,455 gramos de tartrato de antimonio y potasio. $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ y disolver. Agregar lentamente con agitación suave 700 ml de H_2SO_4 concentrado. Enfriar y diluir a volumen de un litro. 4. Solución B: Disolver 61 gramos de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en agua. Completar a 500 ml. 5. Solución de trabajo. A partir de las soluciones A y B, tomar 25 ml de la solución A; transferir

Determinación de fósforo	
Materiales y equipos	Reactivos
- Nevera para guardar las soluciones A y B. - 1 frasco volumétrico de 1 litro (solución A). - 1 volumétrico de 500 ml (solución B). - Beaker de 1 litro. - Estufa graduada a 105 ± 5 °C	a 800 ml de agua en un beaker de 1 litro. Mezclar y añadir 10 ml de la solución B, llevando a volumen de 1 litro con agua. 6. Solución estándar con fósforo: Disolver 0,2195 gramos de fosfato de hidrógeno y de potasio cristalizado (KH_2PO_4), previamente secado una hora a 105 °C. Diluir con agua en balón volumétrico hasta 1 litro. La solución contendrá 50 ppm de fósforo a partir de la cual se preparan las soluciones para la curva patrón de fósforo.

Determinación	
Procedimiento	Cálculos
- Pesar 2,85 g de suelo. - Pasar a un tubo de ensayo de 50 ml. - Añadir 20 ml de la solución extractora. - Agitar durante 40 segundos, manualmente y cronometrando el tiempo. Filtrar la suspensión inmediatamente. - Recibir en un frasco plástico de 50 ml. - Tomar 2 ml del extracto y transferirlo a un erlenmeyer de 125 ml. - Agregar 18 ml de la solución de trabajo.	$\text{ppm P en suelo} = \frac{(\text{Lect.} \times 1.000)}{9,1 \times 50} \times 70,2$ $\text{ppm de P} = (\text{Lect.} \times 1.000) \times 0,15428.**$ Programa en la Sharp PC 1001 *. $\text{HES} \times 0,15428 = \text{FH}$

Fuente. Información tomada del Manual de laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) (Pachón, 1985).

Inventario de la Vegetación. Se llevó a cabo un inventario de la vegetación que se encuentra presente en el área de estudio, detallando la ubicación, fecha y hora de cada registro, así como una descripción de las especies identificadas.

Tabla 5.

Formato para el inventario de la vegetación.

INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN					
Ubicación de la zona	Imagen	Nombre botánico	Familia	Tipo de planta	Abundancia
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Fuente. Elaboración propia.

3.3.2 Determinación de la presencia de las micorrizas.

Para la determinación de la presencia de las micorrizas en el suelo del Jardín Botánico se realizó el aislamiento de las esporas según la metodología de tamizaje y centrifugación en gradiente de sacarosa descrito por Sleverding, 1991.

Equipos y Materiales

- Estereoscopio.
- Balanza de precisión (resolución 0.001g).
- Agitador magnético orbital.
- Centrifuga de 2000 rpm.
- Tubos de 50 ml para centrifuga.
- Jeringa con manguera de caucho.
- Tamices de 500, 250 y 38 μm .
- Embudo.

- Papel filtro.
- Cápsulas de suelo.

Reactivos

- Soluciones de sacarosa en agua al 72%.
- Solución acuosa de Tween 80 al 2%.

Procedimiento microbiológico

1. Se seca la muestra a temperatura ambiente hasta obtener un mínimo de humedad.
2. Se tomaron 50 g de suelo y se agregó en un Erlenmeyer de 250 ml.
3. Se agregaron 100 ml. de agua destilada.
4. Se agitó durante 30 minutos a aproximadamente 100 rpm.
5. Se realizó el tamizado sucesivo a través de cribas de 2,00 mm, 250 μ m, 125 μ m y 38 μ m, para limpiar las esporas con agua corriente.
6. Se recogió el material depositado en el tamiz de 38 μ m y se depositó en un tubo de centrifuga de 50 ml con 25 ml de agua.
7. Se adicionaron 20 ml de solución de sacarosa al 72% + Tween 80 al 2% con ayuda de una manguera; se asegura que la solución permanezca por debajo del material suspendido en agua enfriando durante 1h.
8. Se centrifugó durante 4 minutos a 3600 rpm.
9. Se recoge la interfase superior del centrifugado.
10. Se coloca el contenido de la extracción en un tamiz de 38 μ m y se lava la sacarosa.
11. Se recoge el contenido del tamiz.
12. se realizó el conteo con ayuda de un estereoscopio.

13. Se reporta el número de esporas/g de suelo.
14. Se separaron las esporas por las características morfológicas (color y forma) que la puedan diferenciar de otra, es decir por morfotipos.
15. Se deposita una gota de PVLG en una lámina porta objetos, y en el centro de ésta se adicionará algunas gotas con las esporas de HFMA aisladas usando una aguja o una micropipeta.
16. Se coloca suavemente una lámina cubre objetos sobre la gota de PVLG evitando que las esporas se deslicen hacia los bordes y queden por fuera de la zona de observación.
17. Se observa al microscopio compuesto.
18. Se identificaron las especies de HFMA con base en las características fácilmente observables al microscopio como forma, color, ornamentaciones y número de paredes, etc. Tomando como referencia la guía de Metodologías básicas para el trabajo con Micorriza Arbuscular y Hongos Formadores de Micorriza Arbuscular, de la Universidad Nacional de Colombia, 2010.

3.3.3 Incidencia de los hongos con capacidad micorrizogénica sobre los procesos de restauración de suelos.

Para identificar la incidencia de los hongos micorrízicos en los procesos de restauración de suelos, se realizó una comparación entre los datos obtenidos de los análisis químicos y microbiológicos. Este análisis se complementa con una revisión de la literatura científica, con el objetivo de identificar estudios relevantes previos y extraer conclusiones adicionales.

Se lleva a cabo un análisis entre los parámetros químicos del suelo y la presencia de los hongos micorrízicos identificados. Esto permite comprender mejor cómo estos microorganismos influyen en la composición y calidad del suelo en el contexto específico de la restauración ambiental. La integración de datos obtenidos a través de diferentes métodos de análisis, junto con la revisión de la literatura científica, nos proporciona una visión más completa y precisa sobre el papel de los hongos micorrízicos en los procesos de restauración de suelos, facilitando así el desarrollo de posibles estrategias para la mejora de ecosistemas degradados.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Identificación de las características químicas del suelo y su vegetación en tres zonas del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos al identificar las características químicas del suelo, mientras que la composición de la vegetación se muestra en las Tablas 7, 8 y 9. Las tres zonas del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas destacan diferencias importantes entre las áreas estudiadas, las cuales están influenciadas por factores ambientales como la disponibilidad de nutrientes, como el fósforo, el pH y la materia orgánica. Estos factores, a su vez, influyen en la distribución y abundancia de las especies vegetales presentes.

Características químicas

Tabla 6.

Resultados del análisis químico del suelo.

ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO			
TIPO DE ANÁLISIS	ZONA BAJA	ZONA MEDIA	ZONA ALTA
pH	5,83	6,75	5,08
Materia Orgánica	0,26%	0,28%	0,17%
Fósforo	6,22 ppm	68,3 ppm	10,4 ppm

Fuente. Elaboración propia; Laboratorio de suelos GANACAMPO.

Teniendo en cuenta la tabla 6, el análisis de las características químicas del suelo en las tres zonas del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas revela diferencias significativas. La zona media presenta las condiciones más favorables, con un pH

cercano a neutro (6,75), mayor contenido de fósforo (68,3 ppm) y un nivel incrementado en materia orgánica (0,28%), lo que sugiere un suelo más fértil y adecuado para el desarrollo vegetal. Por el contrario, la zona baja tiene un pH más ácido (5,83), bajo contenido de materia orgánica (0,26%) y fósforo (6,22 ppm), lo que puede limitar la disponibilidad de nutrientes y afectar la vegetación. La zona alta, por su parte, presenta el pH más bajo (5,08), el menor contenido de materia orgánica (0,17%) y fósforo (10,4 ppm), lo que indica un suelo más pobre en nutrientes, lo que podría restringir el crecimiento de las plantas y limitar la biodiversidad en comparación con las otras zonas. Estos resultados sugieren que la zona media tiene un ambiente más propenso para una mayor diversidad y desarrollo vegetal, mientras que las otras zonas, aunque presentan condiciones más desfavorables, podrían estar asociadas a especies vegetales adaptadas a estos suelos.

Además, un estudio realizado por Van der Heijden y Hartmann (2016) demostraron que la diversidad y abundancia de hongos micorrízicos está fuertemente influenciada por el pH y la cantidad de materia orgánica en el suelo, su investigación señala que los suelos con mayor materia orgánica y pH cercano a neutro favorecen la formación de una red más densa de hongos micorrízicos, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes y la salud del ecosistema en general. Por el contrario, en suelos más ácidos y con menos materia orgánica presentan una disminución en la actividad micorrízica, lo que puede reducir la capacidad de las plantas para acceder a nutrientes esenciales como el fósforo (p.03).

Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en el Jardín Botánico, donde la zona media, con su mayor contenido de materia orgánica y pH cercano a neutro, muestran condiciones más favorables para la actividad micorrízica y un desarrollo vegetal más

robusto, este comportamiento refuerza la idea de que las características químicas del suelo son fundamentales para el éxito de las asociaciones micorrízicas y para la productividad vegetal.

Inventario de la vegetación

La Tabla 7 presenta el inventario de la vegetación correspondiente a la zona baja del Jardín Botánico, ubicada en las coordenadas 8°14'17.0" N 73°19'11.0" W, en la cual se detallan las características de las especies identificadas y su abundancia en esta área. Este inventario incluye información relevante sobre las especies, como su nombre botánico, familia, tipo de planta y el número de individuos registrados.

Tabla 7.

Inventario de la vegetación, Zona baja (8°14'17.0" N 73°19'11.0" W).

Inventario de la vegetación			
Zona baja (8°14'17.0" N 73°19'11.0" W)			
	Nombre botánico: <i>Clusia chusqueae</i> Familia: <i>Clusiaceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 4 individuos.		Nombre botánico: <i>Furcraea foetida</i> Familia: <i>Asparagaceae</i> Tipo de planta: Hierba, Arbusto Abundancia: 6 individuos.
	Nombre botánico: <i>Hintonia latiflora</i> Familia: <i>Rubiaceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 6 individuos.		Nombre botánico: <i>Erythrina variegata</i> Familia: <i>Fabeceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 9 individuos.
	Nombre botánico: <i>Persea indica</i> Familia: <i>Lauraceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 12 individuos.		Nombre botánico: <i>Piper aduncum</i> Familia: <i>Piperaceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 15 individuos.

Inventario de la vegetación			
Zona baja (8°14'17.0" N 73°19'11.0" W)			
	Nombre botánico: <i>Lafoensia latifolia</i> Familia: Lythraceae Tipo de planta: Árbol Abundancia: 3 Individuos.		Nombre botánico: <i>Tradescantia zebrina</i> Familia: Commelinaceae Tipo de planta: Enredadera, hierba Abundancia: 25% de cobertura del área de estudio.
	Nombre botánico: <i>Oplismenus hirtellus</i> Familia: Poacea Tipo de planta: Hierba Abundancia: 50% de cobertura del área de estudio.		

Fuente. Elaboración propia.

Considerando la tabla 7 de la vegetación en la zona baja del jardín botánico se logra evidenciar la presencia de distintas familias botánicas, siendo más notable la presencia de *Fabaceae*, *Rubiaceae* y *Lauraceae*. Las familias presentes son una mezcla de hierbas, arbustos y árboles, lo que muestra una gran variedad de vegetación en esta zona.

Entre las familias identificadas con mayor abundancia en la zona baja del jardín botánico está la familia *Piperaceae* con 15 individuos, la especie *Piper aduncum* se destaca como una especie potencialmente dominante en la composición florística de esta zona, este arbusto prospera en suelos bien drenados con humedad adecuada y puede crecer en condiciones que van desde luz media hasta exposición total, la capacidad de adaptación de *Piper aduncum* a cambios estacionales de humedad en áreas premontanas hace que pueda sobrevivir en zonas húmedas, principalmente en áreas sombreadas y cerca de fuentes de agua (Calderón, 2013). Además, *Piper aduncum* forma asociaciones simbióticas con micorrizas arbusculares como *Glomus constrictum*, según el estudio "Infectividad y diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en ecosistemas

tropicales", estas asociaciones favorecen la absorción de nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, lo que le confiere una ventaja competitiva en suelos de fertilidad moderada. (Xavier et al., 2019)

Por otro lado, la familia *Lauraceae*, representada por 12 individuos, incluye a la *Persea indica*, un árbol que se adapta a las condiciones de clima y suelo locales, este tipo de planta prefiere terrenos fértiles, húmedos y con buen drenaje (Borges, 2009). Esta especie también se beneficia de las micorrizas arbusculares, de acuerdo con el artículo "Mitigación de estrés salino mediante *Glomus constrictum* en especies vegetales", esta simbiosis optimiza el crecimiento y la salud del sistema radical, mejorando la eficiencia en la absorción de nutrientes y aumentando su resistencia a estrés ambiental (AL-AMRI, 2019).

En menor abundancia se encuentran las familias *Fabaceae*, representada con la especie *Erythrina variegata*, con 9 individuos, indicando su habilidad para adaptarse a varios microhábitats. Las especies de *Fabaceae* son reconocidas por su alta afinidad por las micorrizas debido a su capacidad de fijación de nitrógeno en simbiosis con bacterias rizobianas, lo que complementa la acción de las micorrizas en la mejora de la nutrición y salud del suelo. La familia *Asparagaceae*, con la especie *Furcraea foetida*, una planta herbácea y arbustiva que se encuentra con 6 individuos y la familia *Clusiaceae*, está representada por la especie *Clusia chusqueae*, con 4 individuos, este árbol que contribuye a la estabilidad ecológica.

Además, otras plantas como *Tradescantia zebrina* y *Oplismenus hirtellus* no están contadas por individuos, sino por porcentaje de cobertura 25% y 50%, respectivamente, siendo especies de cobertura significativa en el área.

La Tabla 8 muestra el inventario de la vegetación en la zona media del Jardín Botánico, ubicada en las coordenadas 8°14'23.7" N 73°19'05.6" W. En esta tabla se presentan las diversas especies de plantas identificadas, como herbáceas, arbustos, árboles y se destaca su abundancia en esta área.

Tabla 8.

Inventario de la vegetación, Zona media (8°14'23.7" N 73°19'05.6" W).

Inventario de la vegetación			
Zona media (8°14'23.7" N 73°19'05.6" W)			
	Nombre botánico: <i>Thelypteris dentata</i> Familia: <i>Aspleniaceae</i> Tipo de planta: Hierba perenne Abundancia: 52 individuos.		Nombre botánico: <i>Piper aduncum</i> Familia: <i>Piperaceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 14 individuos.
	Nombre botánico: <i>Anthurium hoffmannii</i> Familia: <i>Araceae</i> Tipo de planta: Hierba Abundancia: 8 individuos.		Nombre botánico: <i>Psychotria carthagenensis</i> Familia: <i>Rubiaceae</i> Tipo de planta: Arbusto Abundancia: 34 individuos.
	Nombre botánico: <i>Clusia rosea</i> Familia: <i>Clusiaceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 4 individuos.		Nombre botánico: <i>Psidium guajave</i> Familia: <i>Myrtaceae</i> Tipo de planta: Arbusto, árbol Abundancia: 13 individuos.
	Nombre botánico: <i>Ardisia revoluta</i> Familia: <i>Myrsinaceae</i> Tipo de planta: Arbusto Abundancia: 8 individuos.		Nombre botánico: <i>Miconia stenostachya</i> Familia: <i>Melastomataceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 26 individuos.

Inventario de la vegetación			
Zona media (8°14'23.7" N 73°19'05.6" W)			
	Nombre botánico: <i>Oplismenus hirtellus</i> Familia: Poaceae Tipo de planta: Hierba Abundancia: 75% de cobertura del área de estudio.		Nombre botánico: <i>Brosimum rubescens</i> Familia: Moráceas Tipo de planta: Árbol Abundancia: 7 individuos.
	Nombre botánico: <i>Vriesea myriantha</i> (Baker) Betancur Familia: Bromeliaceae Tipo de planta: Hierba Abundancia: 12 individuos.		

Fuente. Elaboración propia.

La tabla 8 muestra una amplia variedad de familias botánicas, como *Aspleniaceae*, *Araceae*, *Piperaceae*, *Rubiaceae* y *Myrtaceae*, que son destacadas. Estas familias incluyen plantas que son herbáceas todo el año, así como arbustos y árboles, lo que muestra una diversa estructura de plantas en la zona media del jardín Botánico.

Dentro de las familias con mayor abundancia identificadas en esta zona está la familia *Aspleniaceae*, con la especie *Thelypteris dentata*, también conocida como "helecho dentado", es una hierba perenne con una notable abundancia de 52 individuos. *Thelypteris dentata* es un helecho tropical que se encuentra comúnmente en bosques húmedos y zonas de sombra, este tipo de planta puede crecer en diferentes suelos si hay suficiente humedad, y prefiere lugares con algo de sombra para evitar la luz solar directa, lo que la hace ideal para entornos tropicales y subtropicales húmedos (Delgado Vázquez & Plaza Arregui, 2006). Este helecho es probable que forme asociaciones con micorrizas arbusculares (AMF), que son comunes en muchas especies de helechos, estas micorrizas ayudan a mejorar la absorción de nutrientes como fósforo y agua, especialmente en suelos con baja fertilidad (Begum et al., 2019).

Otra familia con mayor abundancia en la zona es la *Rubiaceae*, con la especie *Psychotria carthagenensis*, también llamada "cafecillo" o "hoja de Cartagena", es un arbusto que cuenta con una población de 34 ejemplares en este lugar de la zona, este arbusto se encuentra frecuentemente en los bosques tropicales de América y crece en áreas húmedas, con sombra o semisombra, en su estado natural, suele habitar en áreas de sotobosque con sombra parcial y humedad constante, siendo común en zonas bajas húmedas y fértiles. Su habilidad para desarrollarse en zonas de poca luz y terrenos mojados le permite sobrevivir en zonas que ofrecen microclimas húmedos, incluso en regiones áridas (Mendoza et al., 2004). Además, en términos de su relación con las micorrizas, investigaciones han indicado que las especies del género *Psychotria*, como *Psychotria carthagenensis*, pueden formar asociaciones con hongos micorrízicos arbusculares, estas asociaciones son cruciales para mejorar la absorción de nutrientes como fósforo, que es limitada en suelos ácidos o con bajos niveles de nutrientes, un tipo de suelo común en los ecosistemas de sotobosque (Da Silva Moraes et al., 2011).

Con menor cantidad de especies se identificaron las siguientes familias la zona media del jardín Botánico, la familia *Piperaceae*, con la especie *Piper aduncum*, se identificó la presencia de 14 individuos, esta especie presenta habilidades para aclimatarse a distintas alturas y ambientes, beneficiándose por la humedad y sombra de la vegetación circundante (DOUSSEAU et al., 2014). La familia *Araceae*, con la especie *Anthurium hoffmannii*, una planta con 8 ejemplares, crece enormemente en ambientes húmedos y con sombra, esta planta contribuye a la diversidad de la vegetación al estar presente en el sotobosque, además se ha observado que las plantas de la familia *Araceae*, en general, pueden formar relaciones con micorrizas arbusculares (GBIF, 2023). Por último, la familia *Clusiaceae*, con la especie *Clusia rosea*, 4 individuos; se presenta como un árbol o arbusto que ayuda a mantener la estabilidad estructural y ecológica en

esta área del jardín Botánico (Agudelo, 2023). Esta planta, asociada con micorrizas ectotróficas, muestra una sinergia con los hongos micorrízicos, que ayudan a mejorar la absorción de nutrientes, especialmente en suelos con condiciones difíciles para otras especies vegetales. (Hemigraphis, 2020)

La Tabla 9 presenta el inventario de la vegetación de la zona alta, ubicada en las coordenadas 8°14'25.5" N 73°19'06.4" W. En esta tabla se describen las especies identificadas, incluyendo su nombre botánico, familia, tipo de planta y abundancia.

Tabla 9.

Inventario de la vegetación, Zona alta (8°14'25.5" N 73°19'06.4" W).

Inventario de la vegetación			
Zona alta (8°14'25.5" N 73°19'06.4" W)			
	Nombre botánico: <i>Clusia rosea</i> Familia: <i>Clusiaceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 2 Individuos.		Nombre botánico: <i>Psidium guajava</i> Familia: <i>Myrtaceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 5 Individuos.
	Nombre botánico: <i>Byrsomina crassifolia</i> Familia: <i>Malpighiaceae</i> Tipo de planta: Árbol Abundancia: 14 Individuos.		Nombre botánico: <i>Mimosa pudica</i> Familia: <i>Fabaceae</i> Tipo de planta: Hierba Abundancia: 5 Individuos.
	Nombre botánico: <i>Brachiaria decumbens</i> Familia: <i>Poaceae</i> Tipo de planta: Pasto Abundancia: 95% de cobertura del área de estudio.		Nombre botánico: <i>Miconia stenostachya</i> Familia: <i>Melastomataceae</i> Tipo de planta: Árbol, arbusto Abundancia: 2 Individuos.

Fuente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla 9, se evidencia que en la zona alta del área de estudio la vegetación está dominada principalmente por la familia *Poaceae*, con la especie *Brachiaria decumbens*, una especie de pasto que cubre el 95% del área y constituye una densa capa en el suelo. Esta especie es común en áreas abiertas, suelos compactos y ligeramente ácidos, lo que favorece su expansión y dominancia en la zona (Combatt et al., 2008). Además, esta especie forrajera establece una simbiosis beneficiosa con hongos micorrízicos arbusculares, la cual genera ventajas para su desarrollo, ya que mejoran la absorción de los nutrientes disponibles en el suelo, aumentan la resistencia a enfermedades y estrés ambiental (Posada-Almanza et al., 2007).

Entre las especies arbóreas y arbustivas, se encuentra la familia *Malpighiaceae*, con la especie *Byrsonima crassifolia*, se destaca con 14 individuos, adaptándose bien a los suelos de baja fertilidad y condiciones climáticas de altura, lo cual le permite ocupar un espacio relevante en la composición vegetal de la zona alta (Hernández et al., 2022).

La especie *Psidium guajava*, con 5 individuos, demuestra su adaptabilidad a los suelos ligeramente ácidos, siendo una especie pionera que contribuye a la recuperación del terreno. Según Quiñones-Aguilar, et al. (2021) el estudio sobre hongos micorrízicos arbusculares (HMA) realizado en cultivos de *Psidium guajava* ha demostrado que la inoculación con géneros como *Glomus*, *Scutellospora* y *Acaulospora* no solo incrementa su productividad, sino que también optimiza la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Estas asociaciones simbióticas son especialmente efectivas para este tipo de especie vegetal, contribuyendo tanto a su desarrollo como a la mejora de las condiciones del ecosistema en el que se encuentra.

Asimismo, *Mimosa pudica*, con una presencia de 5 individuos, complementa el sotobosque con su capacidad de fijar nitrógeno en el suelo, mejorando la fertilidad local y beneficiando a las especies cercanas (Rodríguez, 2017).

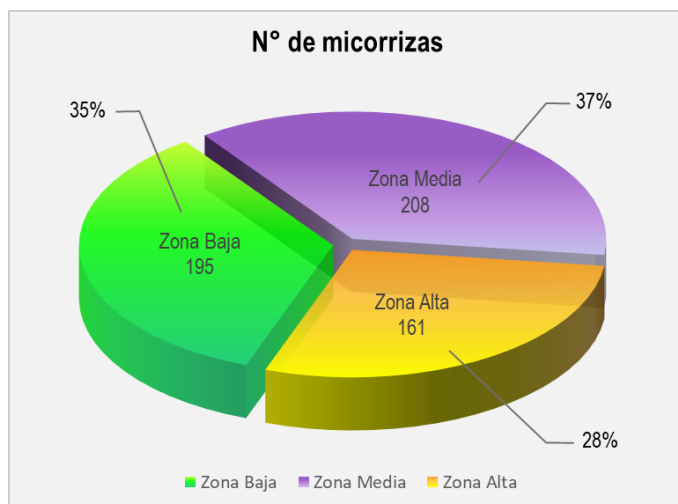
Por último, se identificaron en menor abundancia las especies *Clusia rosea* y *Miconia stenostachya*, con 2 individuos, estas especies toleran el pH ligeramente ácido y el nivel de fósforo de esta zona, pero la baja cantidad de materia orgánica podría limitar su rendimiento a largo plazo. Sin embargo, a pesar de esta limitación, ambas especies aportan diversidad y ayudan a mantener la estabilidad del ecosistema, cumpliendo funciones ecológicas como ofrecer refugio a diversas formas de vida y contribuir a la estructura vertical de la vegetación en la zona alta (Agudelo, 2023).

4.2 Determinación de la presencia de hongos con capacidad micorrizogénica en el suelo del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.

La determinación de la presencia de hongos con capacidad micorrizogénica en el suelo del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas busca evaluar la abundancia de las esporas micorrízicas en las diferentes zonas altitudinales del jardín, en la Figura 3, se presentan los resultados del conteo de esporas micorrízicas obtenidas en las zonas baja, media y alta del jardín Botánico.

Figura 3.

Conteo de las esporas micorrízicas de la zona baja, media y alta del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas.



Fuente. Elaboración propia.

Según el conteo de esporas de micorrizas, se registraron 195 en la zona baja, 208 en la zona media y 161 en la zona alta, estos datos indican una variación en la abundancia de micorrizas entre las zonas, con un número máximo en la zona media y una disminución en la zona alta. Esta distribución es consistente con investigaciones previas que destacan cómo las condiciones ambientales y las propiedades químicas del suelo influyen directamente en la actividad micorrícica. Por ejemplo, un estudio realizado en ecosistemas riparios encontró que el pH y la disponibilidad de nutrientes son determinantes clave en la colonización por micorrizas, favoreciendo áreas con condiciones menos extremas en términos de acidez y nutrientes (Zhou et al., 2022).

Con base en los resultados del conteo de las esporas de micorrizas y los resultados obtenidos del análisis químico del suelo del jardín botánico podemos observar que existe una la relación entre las variables analizadas, las cuales influyen positiva o negativamente en el

desarrollo de las micorrizas en el suelo. Factores como el pH, la materia orgánica y el contenido de fósforo afectan la capacidad de las micorrizas para colonizar las raíces de las plantas y cumplir su función simbiótica. A partir de los datos obtenidos, se puede identificar la siguiente interacción entre las variables:

pH del suelo

El pH del suelo desempeña un papel crucial en la actividad micorrízica, ya que afecta tanto la disponibilidad de nutrientes como la composición microbiana del suelo, por lo cual la zona media, con un pH de 6.75 proporciona un entorno óptimo para el crecimiento de gran variedad de especies vegetales y favorece la actividad micorrízica, donde nutrientes como el fósforo se encuentran con mayor disponibilidad, lo que podría explicar la mayor abundancia de micorrizas. En la zona baja, con un pH de 5.83, aunque ligeramente ácido, el suelo aún permite un conteo moderado de micorrizas, aunque la disponibilidad de nutrientes como el fósforo puede estar levemente limitada. Por otro lado, en la zona alta, con un pH de 5.08, la mayor acidez actúa como un factor limitante, disminuyendo la actividad de muchas especies micorrízicas y afectando negativamente la disponibilidad de fósforo y otros nutrientes esenciales, reduciendo así la interacción simbiótica entre micorrizas y plantas (Carosio, 2018).

Además, estudios realizados en suelos agrícolas muestran cómo la acidez o alcalinidad afecta la población de micorrizas arbusculares, se encontró que niveles de pH entre 6 y 7.5 favorecen su actividad simbiótica, mientras que niveles extremos reducen significativamente la colonización en raíces y el desarrollo de las esporas, esto se ha evaluado especialmente en cultivos con prácticas tradicionales, como el uso de cascarilla de arroz para modificar las características del suelo. (Cuenca et al., 2007)

Materia Orgánica

La materia orgánica es un indicador clave de la calidad del suelo, influyendo directamente en la actividad biológica y la capacidad de retención de nutrientes. Sin embargo, en este caso, los niveles de materia orgánica son bajos en las tres zonas estudiadas. En la zona baja (0,26%) y la zona media (0,28%), aunque los niveles son reducidos, las micorrizas logran adaptarse a estas condiciones al establecer simbiosis con las raíces, lo que permite a las plantas compensar la baja disponibilidad de nutrientes derivados de la materia orgánica. Este comportamiento es consistente con estudios realizados en ecosistemas de dunas, donde las micorrizas desempeñan un papel esencial en la nutrición de las plantas incluso en suelos con bajos niveles de fertilidad (Barceló et al., 2020).

En la Zona Media, un leve aumento en la materia orgánica podría estar proporcionando mejores condiciones microambientales, como mayor retención de humedad y compuestos orgánicos solubles, que favorecen la actividad micorrízica. Por otro lado, en la Zona Alta (0,17%), la menor cantidad de materia orgánica podría estar asociada con un entorno más restrictivo para las micorrizas y los microorganismos del suelo, limitando su capacidad de influir positivamente en las plantas.

Fósforo (P)

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas y uno de los principales beneficios que las micorrizas aportan a sus hospedadores. Sin embargo, la relación entre fósforo y micorrizas no es lineal; niveles demasiado bajos o muy altos de fósforo pueden impactar negativamente la abundancia de micorrizas.

En la Zona Media (68,3 ppm), el fósforo es significativamente más alto que en las otras zonas, ayudando a las plantas a mantener un estado nutricional óptimo y reforzando su capacidad

para sostener la simbiosis micorrízica; además, la baja materia orgánica hace que las plantas dependan de las micorrizas para obtener otros nutrientes como nitrógeno y micronutrientes. En la Zona Baja (6,22 ppm), el fósforo bajo promueve la simbiosis micorrízica, ya que las plantas dependen de esta para mejorar la absorción de nutrientes, lo que explica el conteo moderado de micorrizas, aunque no tan alto como en la Zona Media debido a limitaciones en el pH y la materia orgánica. Por otro lado, en la Zona Alta (10,4 ppm), aunque el fósforo es mayor que en la Zona Baja, la acidez elevada y la baja materia orgánica limitan la actividad de las micorrizas, y este nivel de fósforo no es suficiente para contrarrestar las condiciones adversas del suelo (Hernández et al., 2020).

Con base a lo anterior y haciendo una síntesis, la abundancia de micorrizas en el jardín botánico está estrechamente relacionada con las características químicas del suelo. En la zona baja (pH 5.83, materia orgánica 0.26%, fósforo 6.22 ppm), el conteo moderado de 195 esporas refleja la dependencia de las plantas hacia las micorrizas debido a los bajos niveles de nutrientes. La zona media, con condiciones más favorables (pH 6,75, fósforo 68,3 ppm, materia orgánica 0,28%), presentó la mayor abundancia de micorrizas, con 208 esporas. En contraste, la zona alta (pH 5.08, materia orgánica 0.17%, fósforo 10.4 ppm) mostró la menor cantidad de esporas (161), debido a condiciones menos propicias. Estos resultados subrayan cómo las condiciones químicas del suelo influyen de manera diferenciada en el establecimiento y la interacción simbiótica de las micorrizas en cada zona y resalta la sensibilidad de las micorrizas a las condiciones del suelo, específicamente al equilibrio entre pH y nutrientes como el fósforo (Carrillo et al., 2022).

Identificación de las especies micorrícicas encontradas en los suelos del jardín

botánico

En la Tabla 10, se presentan los resultados obtenidos tras la determinación de la presencia de hongos con capacidad micorrizogénica en el suelo del sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas. Estos resultados abarcan la identificación de las especies micorrícicas encontradas en las diferentes zonas correspondientes al sendero, la zona baja, media y alta.

Tabla 10.

Identificación de las especies micorrícicas.

IDENTIFICACIÓN			
No	Imagen microscópica	Características	Referencia
1		Especie por confirmar: <i>Glomus aurantium</i> Familia: Glomeraceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Globular con superficie lisa Color: Amarillo claro Número de paredes: Consta de una pared compuesta por tres capas: la capa 1, permanente, flexible a semiflexible, con una superficie lisa. La capa 2, laminada, lisa, de color blanco amarillento y la capa 3, flexible, lisa y de apariencia hialina.	(Posada et al., 2010)
2		Especie por confirmar: <i>Glomus sp.</i> Familia: Glomeraceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Esférica o ligeramente ovalada Color: Varía de amarillo pálido a marrón dorado Número de paredes: Generalmente tiene una pared de estructura laminada de 1 a 3 capas.	(Smith & Read, 2008)

IDENTIFICACIÓN			
No	Imagen microscópica	Características	Referencia
3		Especie por confirmar: <i>Glomus Ambisporum</i> Familia: Glomaceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Subglobosa a muy variable Color: Tonalidades que van de marrón oscuro a negro. Número de paredes: La pared de la espóra está compuesta por tres capas distintas, La capa externa es subialina, la capa media consta de subcapas finamente adherentes y la capa más interna es delgada y flexible.	(LÓPEZ, 2004) (INVAM, 2009)
4		Especie por confirmar: <i>Glomus constrictum</i> Familia: Glomaceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Globular con superficie lisa. Color: Marrón oscuro. Número de paredes: Consiste en una pared que contiene dos capas. La capa 1 evanescente, hialina a amarillo pálido y la capa 2 laminada, lisa, de color naranja parduzco a marrón oscuro.	(Bárcena et al., 2011) (Posada et al., 2010)
5		Especie por confirmar: <i>Glomus macrocarpum</i> Familia: Glomeraceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Globosas a subglobosas Color: Marrón a rojizo oscuro. Número de paredes: Posee dos capas además existe una ligera zona de separación entre las dos capas de pared.	(LÓPEZ, 2004)
6		Especie por confirmar: <i>Glomus microcarpum</i> Familia: Glomaceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Subglobosos a alargados, de forma irregular Color: Amarillentas a marrón. Número de paredes: Constan de una pared de tres capas y dos paredes germinales flexibles de dos capas.	(Valderrey, 2012)

IDENTIFICACIÓN			
No	Imagen microscópica	Características	Referencia
7		Especie por confirmar: <i>Glomus etunicatum</i> Familia: Glomaceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Subglobosos a alargados, de forma irregular Color: Amarillentas a marrón Número de paredes: Compuesta por dos capas	(Posada et al., 2010) (LÓPEZ, 2004)
8		Especie por confirmar: <i>Glomus sp4</i> Familia: Glomaceae Género: <i>Glomus</i> Forma: Subglobosa Color: Amarillento claro Número de paredes: Compuesta por un único grupo con tres paredes: la más externa, que le da el color a la espora, laminada. Unida a esta aparece una segunda pared más interna, sólida, de color más claro que la primera. La pared más interna es membranosa, transparente	(Peña et al., 2006) (Posada et al., 2010)
9		Especie por confirmar: <i>Acaulospora mellea</i> Familia: Acaulosporaceae Género: <i>Acaulospora</i> Forma: Globosa Color: Amarillo-oliva Número de paredes: Claramente se distinguen dos grupos de paredes: La pared más externa, laminada, que le da el color a la espora, la segunda pared se observa sólida semi-rígida, transparente, membranosa y delgada.	(Peña et al., 2006)
10		Especie por confirmar: <i>Acaulospora laevis</i> Familia: Acaulosporaceae Género: <i>Acaulospora</i> Forma: Globosa, subglobosa. Color: Salmón a marrón anaranjado más marrón anaranjado pálido. Número de paredes: Constan de una pared de tres capas y dos paredes germinales flexibles de dos capas.	(INVAM, 2009) (Franco et al., 2021)

IDENTIFICACIÓN			
No	Imagen microscópica	Características	Referencia
11		Especie por confirmar: <i>Scutellospora biornata</i> Familia: Gigasporaceae Género: <i>Scutellospora</i> Forma: Globular Color: Marrón claro Número de paredes: La espora presenta una capa externa marrón y una superficie con una textura algo irregular, que puede corresponder a proyecciones romas o pliegues internos, típicos de las capas L1 y L2.	(Semane et al., 2018)
12		Especie por confirmar: <i>Scutellospora heterogama</i> Familia: Gigasporaceae Género: <i>Scutellospora</i> Forma: Globosas a subglobosas, ocasionalmente irregular. Color: Naranja a rojizo oscuro. Número de paredes: Consta de 3 paredes. La primera pared es de color castaño claro, la segunda pared tiene una tonalidad naranja-castaño y la última pared es hialina flexible.	(LÓPEZ, 2004)
13		Especie por confirmar: <i>Scutellospora savannicola</i> Familia: Gigasporaceae Género: <i>Scutellospora</i> Forma: Bilobulado Color: Marrón amarillento a marrón Número de paredes: Consta de 4 paredes, la pared externa tiene una textura lisa, la pared secundaria se caracteriza por tener ornamentaciones y un grosor mayor que la pared externa, la pared intermedia es más flexible y por último la pared interna que es la más delgada.	(Krüger et al., 2014)

Fuente. Elaboración propia.

La Tabla 10 presenta una gran diversidad de especies micorrícicas identificadas en el sendero peatonal del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas, predominando especies del género *Glomus*, como *Glomus aurantium*, *Glomus macrocarpum* y *Glomus etunicatum*, que se

caracterizan por tener formas globulares o subglobulares, con colores que varían desde amarillo claro hasta tonos marrones. Además, sus esporas presentan paredes compuestas por una o varias capas, que les confieren una gran flexibilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales.

Por otro lado, otras especies como *Acaulospora mellea* y *Scutellospora biornata* muestran una mayor diversidad en la estructura de sus paredes. *Acaulospora mellea*, con su espora globosa de color amarillo-oliva, tiene una pared externa laminada que le da su color, mientras que la pared secundaria es semi-rígida y transparente. *Scutellospora biornata*, con su forma globular y color marrón claro, presenta una textura irregular en su pared, que puede incluir proyecciones o pliegues internos. Estas diferencias en la estructura de las paredes de las esporas sugieren una adaptación a diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales. Además, algunas especies como *Scutellospora savannicola* tienen hasta cuatro capas en su pared, lo que refleja una complejidad estructural que puede mejorar su resistencia frente a condiciones adversas del medio ambiente. Esta diversidad sugiere una amplia funcionalidad ecológica, desde la mejora de la absorción de nutrientes hasta la formación de estructuras del suelo más estables. Los resultados reflejan un ecosistema rico en especies micorrícicas, con potencial significativo para aplicaciones en restauración ambiental y sostenibilidad agrícola.

Cabe señalar que en esta investigación se planteó la identificación de las especies de HFMA con base en las características taxonómicas fácilmente observables al microscopio, lo que permite aproximarse a su clasificación. Por lo tanto, para llegar a una identificación exacta de género y especie, es recomendable el uso de técnicas moleculares que corroboren las determinaciones realizadas a partir de los rasgos morfológicos de las esporas.

4.3 Análisis de la incidencia de los hongos con capacidad micorrizogénica sobre los procesos de restauración de suelos

A partir de la información presentada en la Tabla 10, se observa que el género *Glomus* predomina en la zona de estudio, con diversas especies de hongos micorrízicos que son utilizados para la restauración y mejora de suelos debido a su capacidad para formar simbiosis con una amplia gama de plantas. Según Shekhar y Basu (2017), *Glomus constrictum* es una especie importante en iniciativas de restauración, ya que esta especie destaca por su capacidad para soportar situaciones de estrés, optimizar la absorción de nutrientes, aumentar la resistencia de las plantas al estrés hídrico y, a su vez, ayudar a mejorar la retención de agua del suelo y por tanto la tolerancia a la sequía de las plantas en las que se instala, su uso ha resultado especialmente útil en la restauración de ecosistemas áridos o semiáridos, así como en la restauración de suelos agrícolas degradados (p.2604). Asimismo, la especie *Glomus etunicatum*, es la especie más utilizada para la rehabilitación de suelos, esta especie tiene buena influencia en la recuperación de suelos contaminados y degradados ya que facilita la absorción de nutrientes esenciales como el fósforo, optimiza la estructura del suelo y apoya el desarrollo de sus agregados, lo que favorece la retención de agua y la estabilidad estructural (Zhou et al., 2022).

Además, estudios previos destacan la relevancia del género *Glomus* en procesos de restauración ecológica. Por ejemplo, Montañó Arias, et al. (2007) llevaron a cabo el análisis sobre la diversidad, distribución e impacto de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en zonas áridas y perturbadas, buscando desarrollar programas de restauración ecológica que incluyera la inoculación de plantas con HMA, donde se destacó el género *Glomus*, que mostró resultados sobresalientes en el crecimiento y producción de biomasa de *Prosopis juliflora*, así como en la mejora de las propiedades químicas del suelo, incluyendo una reducción del pH y un aumento

del carbono y fósforo disponibles. Por otro lado, Arun, et al. (2019), sugiere que otra especie de *Glomus* destacada es *Glomus microcarpum*, ya que también muestra importantes beneficios para la remediación y fortalecimiento de plantas en ambientes degradados al contribuir a la estabilización del suelo a través de la simbiosis con las raíces de las plantas hospedantes y mejorar la productividad agrícola. Investigaciones más recientes, como las llevadas a cabo en ecosistemas kársticos y áreas agrícolas restauradas, el género *Glomus* sigue siendo clave, particularmente en la mejora de la estructura del suelo, la retención de agua y la mejora de la biodiversidad del suelo, estos hongos micorrízicos ayudan a estabilizar los suelos y mejorar las condiciones para la plantación, lo que a su vez favorece la rehabilitación ecológica. (Mingming et al., 2024)

En cuanto al género *Acaulospora*, se han identificado especies como *Acaulospora mellea* y *Acaulospora laevis*, que poseen un gran potencial para la restauración de suelos y la mejora de cultivos al incrementar la resistencia de las plantas y facilitar la absorción de nutrientes en diversos entornos. En México, García-Velasco (2016) realizó un estudio que aisló e identificó hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados a la rizósfera de siete especies vegetales que colonizan espontáneamente residuos de minería. En este estudio, se evidenció que el género *Acaulospora* jugó un papel relevante, destacándose especialmente *Acaulospora mellea*, que demostró una notable capacidad para adaptarse a suelos con altas concentraciones de MP. Este hongo contribuyó de manera significativa a la estabilización de metales pesados en las raíces de las plantas, reduciendo el impacto ambiental en la vegetación local y minimizando la acumulación de metales en los tejidos aéreos de las plantas, lo que refuerza su utilidad en programas de recuperación ecológica y manejo sostenible de suelos contaminados. Finalmente, la especie *Acaulospora laevis*, ha sido asociada con la reducción del uso de agroquímicos, lo que

la convierte en una opción valiosa para restaurar la salud del suelo sin recurrir a químicos que puedan ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana (Catalani et al., 2024).

Finalmente, especies como la *Scutellospora biornata*, *Scutellospora heterogama*, y *Scutellospora savannicola*, estas especies también han sido estudiadas en suelos de pastizales y han mostrado una notable capacidad para mejorar la estructura del suelo y la resistencia de las plantas a condiciones de estrés, como la sequía y cambios en el pH del suelo. Su presencia contribuye además a la mejora de la estabilidad de los agregados del suelo, un factor clave en los procesos de restauración ecológica (Lugo et al., 2023).

De acuerdo con lo anterior podemos concluir que las especies de micorrizas identificadas que pueden contribuir a la restauración y mejora de ecosistemas degradados son las micorrizas del género *Glomus*, ya que se posiciona como el grupo de micorrizas con mayor potencial para la restauración de suelos debido a su predominancia en la zona estudiada, su alta adaptabilidad a condiciones ambientales adversas y su efectividad comprobada en diversos estudios. Este género no solo sobresale por formar simbiosis con una amplia variedad de plantas, sino también por su capacidad de optimizar la absorción de nutrientes esenciales como el fósforo, mejorar la estructura del suelo, incrementar la retención de agua y la tolerancia al estrés hídrico, y potenciar la resistencia de las plantas en suelos degradados. Además, los datos de la literatura destacan a *Glomus etunicatum*, *Glomus constrictum*, y *Glomus microcarpum* como especies clave en la rehabilitación de suelos agrícolas y ecosistemas degradados, así como en la mejora de propiedades químicas y físicas del suelo. Estas características hacen del género *Glomus* una herramienta fundamental en programas de restauración ecológica, consolidándolo como el género más empleado y efectivo para la recuperación sostenible de suelos degradados (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

Capítulo 5. Conclusión

La caracterización de hongos micorrízicos en el Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas resalta la importancia de estos microorganismos como agentes clave en la restauración ecológica y el sostenimiento de la fertilidad del suelo. Las diferencias en la abundancia de esporas entre la zona baja, media y alta del sendero indican que factores como el pH, la materia orgánica y los niveles de fósforo influyen significativamente en su distribución y funcionalidad. En particular, la zona media demuestra las condiciones más favorables para la actividad micorrízica debido a su pH cercano a la neutralidad y altos niveles de fósforo, mientras que las zona baja y alta presentan limitaciones asociadas a la acidez del suelo y bajos contenidos de materia orgánica, estos resultados evidencian no solo la sensibilidad de las micorrizas a las condiciones edáficas, sino también su capacidad de adaptación para contribuir al equilibrio ecológico del suelo, mejorando la absorción de nutrientes por parte de las plantas y potenciando la resiliencia de los ecosistemas. La información obtenida constituye una base fundamental para diseñar estrategias que integren el uso de hongos micorrízicos en la restauración de ecosistemas degradados y en la gestión sostenible de suelos en la región.

Capítulo 6. Recomendaciones

Se recomienda expandir el área de estudio a otras zonas del Jardín Botánico Jorge Enrique Quintero Arenas y ecosistemas similares en la región, esto permitirá evaluar si las características químicas del suelo y la biodiversidad de hongos micorrízicos observadas son representativas de un patrón regional o si responden a condiciones locales específicas.

Se sugiere ampliar los métodos utilizados en esta investigación mediante la integración de técnicas moleculares que permiten una identificación más precisa y robusta de las especies de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA). Aunque las características morfológicas observables al microscopio (como forma, color y número de paredes) proporcionan una valiosa aproximación inicial, estas pueden ser insuficientes para diferenciar especies con morfologías similares o para validar determinaciones taxonómicas complejas. Incorporar herramientas moleculares, como el análisis de ADN ribosomal o marcadores genéticos específicos, permitirá corroborar las identificaciones basadas en la morfología, garantizando mayor exactitud y confiabilidad en los resultados.

El éxito de proyectos como este puede incrementarse significativamente a través de la colaboración con otras instituciones académicas, organizaciones ambientales y entidades gubernamentales. Se recomienda establecer convenios de cooperación para promover investigaciones conjuntas que exploren nuevas aplicaciones de los hongos micorrízicos en diversos contextos, lo que facilitaría el acceso a fondos y recursos técnicos, ampliando el alcance y el impacto del proyecto.

Referencias

- Acosta, M. B. (15 de 02 de 2021). *Ecologiaverde.com*. Obtenido de Ecologiaverde.com:
<https://www.ecologiaverde.com/micorrizas-que-son-y-tipos-2498.html>
- Agudelo, R. L. (2023). *Miconia stenostachya*. Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia. *Universidad Nacional de Colombia*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15472/7avdhn>
- AL-AMRI, S. M. (2019). Mitigación de estrés salino mediante *Glomus constrictum* en especies vegetales. *EPA (Ecologia Aplicada e Investigacion Ambiental)*, 17(4).
https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1704_99659978
- Alcaldia Municipal de Ocaña Norte de Santander. (2020). *Municipio*. Obtenido de
<https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/>
- Al-Karaki, G. (2013). El papel de las micorrizas en la recuperación de tierras degradadas en entornos áridos. *Springer*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-5332-7_48
- Allen, E., Allen, M., Egerton-Warburton, L., Corkidi, L., & Gómez-Pompa, A. (2003). IMPACTOS DE LAS MICORRIZAS SERALES TEMPRANAS Y TARDÍAS DURANTE LA RESTAURACIÓN EN BOSQUES TROPICAL ESTACIONALES, MÉXICO. 13(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1890/02-5309>
- Arun, A. K., Ray, J. G., & Nidheesh, K. (2019). Native arbuscular mycorrhizal fungal isolates (*Funneliformis mosseae* and *Glomus microcarpum*) improve plant height and nutritional status of banana plants. *Experimental agriculture*, 55(6), 924-933.
<https://doi.org/10.1017/s0014479719000036>
- Asmelash , F., Bekele, T., & Birhane, E. (2016). El papel potencial de los hongos micorrízicos arbusculares en la restauración de tierras degradadas. *Frontiersin*, 7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01095>

Astillero, A. G. (29 de 01 de 2019). *Ecologia verde*. Obtenido de Ecologia verde:

<https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-suelos-y-sus-principales-caracteristicas-1645.html>

Barceló, M., van Bodegom, P., Tedersoo, L., den Haan, N., Veen, G., Ostonen, I., . . .

Soudzilovskaia, N. (2020). The abundance of arbuscular mycorrhiza in soils is linked to the total length of roots colonized at ecosystem level. *PloS one*, 15(9), e0237256.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237256>

Bárcenas, A. O., Fregoso, L. V., Stürmer, S., & Bárcenas, A. C. (2011). *Catálogo de hongos*

micorrizógenos arbusculares de huertos de aguacate de Michoacán, México. Obtenido

de https://www.avocadosource.com/wac7/Section_02/BarcenasAE2011.pdf

Barea, J. M., Azcón, R., & Azcón, C. (2002). Interacciones de la micorrizosfera para mejorar la

aptitud de las plantas y la calidad del suelo. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 81.

<https://doi.org/10.1023/A:1020588701325>

Begum , N., Qin, C., Abass Ahanger , M., Sajjad, R., Ishfaq Khan, M., Ashraf, M., . . . Zhang1,

L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 10.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>

Borges, J. N. (2009). *Persea indica*. Obtenido de Persea indica:

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/Semillas%20-%20Fichas%20de%20especies%20P_tcm30-100340.pdf

Calderón, W. T. (2013). *EL GÉNERO PIPER L. (PIPERACEAE) EN EL ALTO CAQUETÁ,*

ZONA DE TRANSICIÓN ANDINO-AMAZÓNICA DE COLOMBIA. Obtenido de EL

GÉNERO PIPER L. (PIPERACEAE) EN EL ALTO CAQUETÁ, ZONA DE TRANSICIÓN ANDINO-AMAZÓNICA DE COLOMBIA:

<https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/6/8%20el%20gnero%20piper%20pipe raceae%20en%20el%20alto%20caquet%20zona%20de%20transicin%20andino%20amaz nica%20de%20colombia.pdf>

Camacho, S. M. (14 de Abril de 2021). *Tecnicrop Ibérica S.L.* Obtenido de Importancia de la conservación del suelo: <https://tecnicrop.com/blog/importancia-de-la-conservacion-del-suelo#:~:text=El%20suelo%20es%20un%20sistema,y%20los%20nutrientes%20que%20necesitan.>

Camarena-Gutiérrez, G. (13 de Diciembre de 2011). INTERACCIÓN PLANTA-HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10.5154/r.rchscfa.2011.11.093. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v18n3/v18n3a12.pdf>

Camargo Ricalde, S. L., Montaña, N. M., Mera, C. J., & Montaña Arias, S. A. (01 de JULIO de 2012). MICORRIZAS: UNA GRAN UNIÓN DEBAJO DEL SUELO. *Revista Digital Universitaria*, 13(7), 04.

Camargo-Ricalde, S. L., Montaña, N., De laRosa-Mera, C., & Montaña Arias, S. (01 de Julio de 2012). *MICORRIZAS: UNA GRAN UNIÓN DEBAJO DEL SUELO*. Obtenido de Revista Digital Universitaria: <https://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/art72.pdf>

Carosio, M. E. (2018). “*Relación de los hongos formadores de micorrizas respecto de las variables fisicoquímicas de suelos de Mendoza cultivados con tomate para industria*”. Obtenido de “Relación de los hongos formadores de micorrizas respecto de las variables fisicoquímicas de suelos de Mendoza cultivados con tomate para industria”:

https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10089/tesis-imnr-carosio-mara-emilia-2018.pdf

Carrillo Saucedo, S. M., Puente Rivera, J., Montes Recinas, S., & Cruz Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botanica mexicana*(129). <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>

Carrillo, S. M., Puente Rivera, J., Montes Recinas, S., & Cruz Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botanica mexicana*(129). <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>

Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Mycorrhizas as a tool for ecological restoration. *SciELO Analytics*, (p.04).

Catalani, A., Brunor, E., Chilosi, G., Bernardini, A., Vanino, S., Migliore, M., . . . Biasi, R. (2024). Soil traits and grapevine rootstock genotypes modulate arbuscular mycorrhizal rate and species in a Mediterranean environment. *Agriculture*, 14(8), 1425. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081425>

Cerón Rincón, L. E., & Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos . *Rev. Colomb. Biotecnol*, XIV(1), 285-295.

Céspedes, A. M. (11 de Julio de 2023). *Los beneficios de los hongos de suelo en la producción agrícola: trichodermas y micorrizas*. Obtenido de Plataforma Tierra : <https://www.plataformatierra.es/innovacion/beneficios-hongos-suelo-produccion-agricola-trichodermas-micorrizas/>

Combatt, E., Jarma, A., & Maza, L. (18 de julio de 2008). *CRECIMIENTO DE Brachiaria decumbens Stapf Y Cynodon nlemfuensis Vanderyst EN SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DE CÓRDOBA*. Obtenido de Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias

Agrícolas: chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclcfindmkaj/http://www.scielo.org.co/pdf/mvz/v13n2/v13n2a14.pdf

Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., & Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en areas tropicales.

Interciencia, 32(1), 23-29.

[https://doi.org/https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-](https://doi.org/https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000100006)

18442007000100006

Da Silva Moraes, T., Rodrigues Rabelo, G., Ribeiro Alejandrino, C., Da Silva Neto, S., & Da Cunha, M. (2011). Comparative leaf anatomy and micromorphology of Psychotria

species (Rubiaceae) from the Atlantic Rainforest. *Acta botanica Brasilica*, 25(1), 178-

190. <https://doi.org/10.1590/s0102-33062011000100021>

Delgado Vázquez, A., & Plaza Arregui, L. (2006). *Helechos amenazados de Andalucía*.

Obtenido de Helechos amenazados de Andalucía:

https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/helechos_amenazados/libro_helechos.pdf

Delgado-Álvarez, A., Martín-Alonso, G., & Rivera-Espinosa, R. (2021). Benefits of co-inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and rhizobia in bean cultivation. 43(3).

Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1932/193275342014/html/>

DOUSSEAU, S., CHAVES, I., EVARISTO MAURO DE CASTRO, & AMAURI ALVES DE ALVARENGA. (2014). *Caracterización del limbo de Piper aduncum L. (Piperaceae):*

Análisis estructurales, histoquímicos y de sus aceites esenciales. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.cl/pdf/gbot/v71n1/15.pdf

DUPO, D. d. (13 de Mayo de 2022). *La diversidad de los hongos del suelo juega un papel fundamental en la estabilidad de los ecosistemas terrestres*. Obtenido de <https://www.upo.es/diario/ciencia/2022/05/la-diversidad-de-los-hongos-del-suelo-juega-un-papel-fundamental-en-la-estabilidad-de-los-ecosistemas-terrestres/#:~:text=Se%20conoce%20que%20los%20hongos,productividad%20de%20los%20ecosistemas%20terrestres>.

Fajardo, L., Cuenca, G., Arrindell, P., Capote, R., & Hasmy, Z. (08 de 12 de 2011). EL USO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN LAS PRÁCTICAS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA. *Revista Interciencia*, 36(12). <https://doi.org/0378-1844/11/12/931-06>

Follow-up of a Composite Endomycorrhizal Inoculum in the Rhizosphere of Olive Plants, Analysis after 42 Months of Culture. (2018).

Fondo Mundial para la naturaleza . (11 de 09 de 2021). *¿Qué es la biodiversidad?* Obtenido de [¿Qué es la biodiversidad?: https://www.wwf.org.co/?328100/Glosario-ambiental-Que-es-la-biodiversidad](https://www.wwf.org.co/?328100/Glosario-ambiental-Que-es-la-biodiversidad)

Franco-Ramírez , A., Perez , J., Sánchez Viveros, G., Cerdán, C., Almaraz-Suárez, J., Cetina, V., & Alarcon, A. (2021). Mobilization and transfer of nine macro-and micronutrients to *Pinus greggii* seedlings via arbuscular mycorrhizal fungi. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. <https://doi.org/92.923238.10.22201/ib.20078706e.2021.92.3238>

Gadkar, V., Schwartz, R., Kunik, T., & Kapulnik, Y. (2001). Colonización fúngica micorrízica arbuscular. Factores que intervienen en el reconocimiento del huésped. *Plant physiology*, 127(4), 1493-1499. <https://doi.org/10.1104/pp.010783>

Gallego y J. Sánchez, E. (s.f). *MYCO-UAL*. Obtenido de MICORRIZAS:
<https://w3.ual.es/GruposInv/myco-ual/micorr.htm>

García-Velasco, G. P. (Junio de 2016). *DIVERSIDAD Y POTENCIAL FITORREMEDIADOR DE HONGOS DE MICORRIZA ARBUSCULAR EN ESPECIES VEGETALES QUE COLONIZAN JALES MINEROS*. Obtenido de INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA:
http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/263/1/Garc%c3%ada%20Velasco%2c%20G.%20P.%2c%202016.pdf

Garzón, L. P. (2015). Importancia de las micorrizas arbusculares (ma) para un uso sostenible del suelo en la amazonia colombiana. *SciELO*, 221.

GBIF. (2023). *Anthurium hoffmannii*. *Taxonomía básica de GBIF*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15468/39omei>

Gonzalez, M., Arango, C., Pastorin, G., & Ruscitti, M. (2011). *Micorrizas arbusculares*.
CAPÍTULO 5 Micorrizas arbusculares y la restauración de ecosistemas degradados.
Micorrizas arbusculares. (5 ed.). Obtenido de core.ac.uk:
<https://core.ac.uk/download/pdf/326823851.pdf#page=89>

González, V. (27 de 05 de 2013). *Laguia2000.com*. Obtenido de Laguia2000.com:
<https://biologia.laguia2000.com/hongos/las-micorrizas-y-su-importancia-en-los-ecosistemas>

- Grand , A., & Michel, V. (2020). *MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO*. Obtenido de <https://orgprints.org/id/eprint/43417/7/MATERIA%20ORGA%CC%81NICA%20DEL%20SUELO.pdf>
- Grupo Técnico Sobiotech S.A.S. (s.f.). *Squarespace.com*. Recuperado el 28 de 02 de 2023, de *Squarespace.com*:
<https://static1.squarespace.com/static/59bc6b2d29f1875d21620187/t/59c08065a9db09bbafb0abfb/1505788016912/Curso+Micorrizas+-+Documento+1.pdf>
- Hemigraphis, A. (09 de 06 de 2020). *Mycorrhizae.com*. Obtenido de *Mycorrhizae.com*:
<https://www.mycorrhizae.com/wp-content/uploads/2017/03/Mycorrhizal-Status-of-Families-and-Genera-v1.6.pdf>
- Hernández Acosta, E., Trejo Aguilar, D., Rivera Fernández, A., & Ferrera Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C*, 38(3), 613-628.
<https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>
- Hernández, A., Roldán, C., Parra, A., & Ávila, A. (05 de octubre de 2022). *Revisión del estudio etnobotánico, fitoquímico y farmacológico de Byrsonima crassifolia (L.) Kunth (Malphigeaceae)*. Obtenido de <file:///C:/Users/AsusTUF/Downloads/Dialnet-RevisionDelEstudioEtnobotanicoFitoquimicoYFarmacol-9143085.pdf>
- Hernández, E., Trejo Aguilar, D., Rivera Fernández, A., & Ferrera Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C*, 38(3), 613-628.
<https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>

Honrubia, M. (2009). Obtenido de Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años:

file:///C:/Users/jvergel/Downloads/DANIELA/MICRORRIZAS/doc.info/Dialnet-LasMicorrizas-3117856.pdf

ICN, I. d. (2004). *Clusia chusqueae*. Obtenido de Herbario Nacional Colombiano (COL), colecciones científicas en línea: <https://catalogofloraaltamontana.eia.edu.co/species/284>

IDEAM. (2019). *MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS*. Obtenido de ECOSISTEMAS: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/monitoreo-seguimiento-estado-calidad-suelos#:~:text=Actualmente%20el%2040%25%20del%20%C3%A1rea,grados%20severos%20y%20muy%20severos.>

INVAM. (2009). *Colección internacional de hongos micorrízicos vesiculares arbusculares*. Obtenido de Acaulospora laevis: <https://invam.ku.edu/laevis>

INVAM. (2009). *Glomus ambisporum*. Obtenido de Colección internacional de hongos micorrízicos vesiculares arbusculares: <https://invam.ku.edu/ambisporum>

Kamaruzaman, M. T., & Othman, S. a. (2010). Mycorrhizal Fungi as a Biocontrol Agent. *Plant Pathology Journal*, 9(4), 199. https://doi.org/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/69308180/Mycorrhizal_fungi_as_a_biological_contro20210910-5783-1n502kd.pdf?1631268145=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMycorrhizal_fungi_as_a_biological_contro.pdf&Expires=1734187041&Signature=d8OweL

- Krüger, C., Walker, C., & Schüßler, A. (2014). *Scutellospora savannicola* : redescrípción, epitipificación, codificación de ADN y transferencia a *Dentiscutata*. *Mycological Progress*, 13(1005). <https://doi.org/10.1007/s11557-014-1005-z>
- Kumari, P., Bhatia, M., Giri, P., & Lal Uniyal, P. (2024). Mycorrhizal association and its relation with pteridophytes. *Frontiers in microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1406891>
- López Encina, C., & Barceló Muñoz, A. (2020). *uma.ex*. Recuperado el 28 de 02 de 2023, de *uma.ex*: <https://www.uma.es/estudios/centros/Ciencias/publicaciones/encuentros/ENCUENTROS55/micorrizas.html>
- LÓPEZ, H. J. (2004). *CARACTERIZACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES (HMA) NATIVAS, EN SEIS COBERTURAS DE CÍTRICOS EN EL PIEDEMONTE DEL META*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA : <https://es.slideshare.net/slideshow/tesismicorrizasfrutales/46139827#87>
- Lugo, M., Ontivero, R., Iriarte, H., Yelikbayev, B., & Pagano, M. (2023). The diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their associations in south America: A case study of Argentinean and Brazilian cattle raising productive ecosystems: A review. *Diversity*, 15(9), 1006. <https://doi.org/10.3390/d15091006>
- Mendoza, H., Ramírez, B., & Jiménez, L. (2004). *RUBIACEAE DE COLOMBIA*. Obtenido de RUBIACEAE DE COLOMBIA: <http://www.bionica.info/biblioteca/MendozaRubiaceaeColombia.pdf>
- Mingming, S., Xiao, Y., Zhang, W., & Kelin, E. (2024). Impacts of managed vegetation restoration on arbuscular mycorrhizal fungi and diazotrophs in Karst ecosystems. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 10(4), 280. <https://doi.org/10.3390/jof10040280>

Montaño Arias, N., Camargo Rical, S., García Sánchez, R., & Monroy Ata, A. (2007).

MICORRIZAS ARBUSCULARES EN ECOSISTEMAS ÁRIDOS Y SEMIÁRIDOS.

[https://doi.org/https://www.researchgate.net/profile/Noe-](https://doi.org/https://www.researchgate.net/profile/Noe-Montano/publication/262487131_Arbuscular_mycorrhizae_in_arid_and_semiarid_ecosystems/links/5a9452260f7e9ba42970c4d8/Arbuscular-mycorrhizae-in-arid-and-semiarid-ecosystems.pdf)

[Montano/publication/262487131_Arbuscular_mycorrhizae_in_arid_and_semiarid_ecosystems/links/5a9452260f7e9ba42970c4d8/Arbuscular-mycorrhizae-in-arid-and-semiarid-ecosystems.pdf](https://doi.org/https://www.researchgate.net/profile/Noe-Montano/publication/262487131_Arbuscular_mycorrhizae_in_arid_and_semiarid_ecosystems/links/5a9452260f7e9ba42970c4d8/Arbuscular-mycorrhizae-in-arid-and-semiarid-ecosystems.pdf)

Moore, D., Robson, G., & Trinci, A. (07 de 1919). *Org.uk*. Obtenido de *Org.uk*:

https://davidmoore.org.uk/21st_century_guidebook_to_fungi_platinum/Ch13_08.htm

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (11 de 05 de 2016). *Agencia SINC*. Obtenido de Agencia

SINC: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/La-ecologia-del-suelo-influye-en-los-ciclos-del-carbono-y-el-nitrogeno>

Pachón, I. F. (1985). *Manual de laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ)*.

Peña, C. P., Cardona, G. I., Mazorra, A., Arguellez, J. H., & Arcos, A. L. (15 de 06 de 2006).

Micorrizas arbusculares de la Amazonia colombiana. Obtenido de Catálogo ilustrado.

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI:

https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/catalogo_micorrizas%20para%20web.pdf

Posada, R. H. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con Micorriza Arbuscular y Hongos Formadores de Micorriza Arbuscular*.

Posada-Almanza, R. H., Franco-Castro, L. A., Cuéllar-Calderón, A. P., Sánchez-Chacón, W., & Sánchez-Figueroa, A. P. (2007). *Inóculo de hongo de micorriza arbuscular en pasturas de brachiaria decumbens (poaceae) en zonas de loma y vega*. Obtenido de Universidad

- Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/39074/27175-95345-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríque, G., & López-Pérez, L. (2021). Hongos micorrízicos nativos como promotores de crecimiento en plantas de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.646>
- Robles González, K., Álvarez Solís, J., Bertolini, V., & Pérez Luna, Y. (2023). DIVERSIDAD Y PROPAGACIÓN DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NATIVOS DE UN CAFETAL ORGÁNICO EN CHIAPAS, MÉXICO. *Revista fitotecnia mexicana*, 46(2), 147. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.147>
- Rodríguez. (2017). *Mimosa pudica*. Lista comentada de las plantas vasculares de bosques secos prioritarios para la conservación en los departamentos de Atlántico y Bolívar (Caribe colombiano). *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15472/lugrmb>
- Ruben. (08 de 03 de 2019). *Zoberbac Agrocompany*. Obtenido de <https://zoberbac.com/todo-lo-que-hay-que-saber-del-fosforo-en-los-cultivos-agricolas/#:~:text=Cu%C3%A1l%20es%20la%20relaci%C3%B3n%20del,desfijar%20elementos%20en%20la%20tierra>.
- Salmerón-Santiago, I. A., Pedraza-Santos, M. E., Mendoza-Oviedo, L. S., & Chávez-Bárceñas, A. T. (2015). Cronología de la taxonomía y cladística de los glomeromicetos. *Revista fitotecnia mexicana*, 38(2). <https://doi.org/https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n2/v38n2a5.pdf>

- Sánchez, E., Jácome, L. A., Ospina, O., Velásquez, O., Bayona, R., & Rodríguez, I. (2014). *Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Obtenido de PROYECTO EDUCATIVO INSTITUCIONAL:
https://ufpso.edu.co/ftp/pdf/documentos/pei_ufpso3_114754_239.pdf
- Semane, F., Chliyah, M., Kachkouch, W., Touati, J., Selmaoui, K., & Ouazzani Touhami, A. (2018). Follow-up of a Composite Endomycorrhizal Inoculum in the Rhizosphere of Olive Plants, Analysis after 42 Months of Culture. *Annual Research & Review in Biology*. <https://doi.org/22.1-18.10.9734/ARRB/2018/38604>.
- Shekhar, M., & Basu, M. (2017). Biodiversity of Glomus species in the rhizosphere of some ornamental plants of family Asteraceae. *International journal of current microbiology and applied sciences*, 6(11), 2603-2609. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.305>
- Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Soudzilovskaia, N., van Bodegom, P., Terrer, C., van't Zelfde, M., McCallum, I., McCormack, M., . . . Tedersoo, L. (2019). Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks. *Nature Communications*, 1(10), 2041-1723.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13019-2>
- Valderrey, J. L. (03 de 05 de 2012). *Glomus microcarpum*. Obtenido de asturnatura.com:
<https://www.asturnatura.com/especie/glomus-microcarpum>
- Van der Heijden, M. G., & Hartmann, M. (2016). Networking in the plant microbiome. *PLoS biology*, 14(2), 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002378>
- Vargas, O. (Noviembre de 2007). *Guía metodológica para la RESTAURACIÓN ECOLÓGICA del bosque altoandino*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50325392/Guia-Metodologica_restauracion-de-

bosques-altoandinos_1-libre.pdf?1479223776=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DOrlando_Vargas_Editor_Grupo_de_Restaura.pdf&Expires=1733590351&Signature=PcbkLo

World Wildlife Fund. (08 de 07 de 2024). *Deforestación en Colombia en el 2023: la cifra más baja en 23 años*. Obtenido de Deforestación en Colombia en el 2023: la cifra más baja en 23 años: <https://www.wwf.org.co/?389691/Deforestacion-Colombia-2023-informe-cifras-y-causas>

Xavier, L., Lins, A., Andrade, E., S. Maia, J., de Mello, A., Setzer, W., . . . F. de Oliveira, J. (2019). Effects of inoculation by arbuscular mycorrhizal fungi on the composition of the essential oil, plant growth, and lipoxygenase activity of *Piper aduncum* L. *AMB express*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0756-y>

Zhou, Y., Chen, K., Atif Munir, M., Cong Cong, L., Distrito , Tang , Y., . . . de Baoming, J. (2022). La humedad del suelo y el pH determinan de manera diferencial la composición de los hongos micorrízicos arbusculares en la zona ribereña a lo largo de un río alpino de la cuenca de Nam Co. *Frontiers in microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.994918>

ZHOU, Y., LIU, Y., WANG, Y., & YANG, C. (2022). *Claroideoglomus etunicatum* improved the growth and saline–alkaline tolerance of *Potentilla anserina* by altering physiological and biochemical properties. *Biocell: official journal of the Sociedades Latinoamericanas de Microscopia Electronica ... et. al*, 46(8), 1967-1978. <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.019304>

Apéndices

Apéndice A. Evidencia fotográfica del procedimiento de delimitación y recolección de muestras químicas y microbiológicas en la zona baja, media y alta del sendero peatonal del Jardín Botánico.

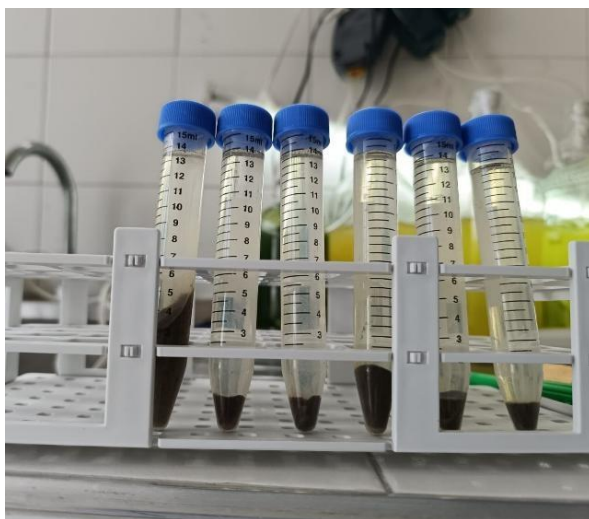




Fuente: Autores de la investigación.

Apéndice B. Evidencia fotográfica del procedimiento para la determinación de la presencia e identificación de micorizas.





Fuente: Autores de la investigación.

Apéndice C. Informe analítico del Laboratorio Químico Ganacampo.



✉ lab@ganacampo.com 🌐 www.ganacampo.com
 📍 CARRERA 33 #30A-49 PISO 2
 BUCARAMANGA | SANTANDER | COLOMBIA
 ☎ 3158740887 | 6179211

INFORME ANALÍTICO DE SUELO AGRICOLA

Número Registro:	8830	Fecha:	24/09/2024
Muestra:	ZONAS 1-2-3	Cliente:	DANIELA ORTEGA
Finca:		Localización:	OCAÑA - NORTE DE SANTANDER

RESULTADO

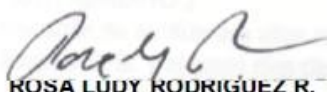
PROPIEDADES QUÍMICAS

Muestra

Espectrofotometría

Fósforo (Bray II)	ppm	ZONA 1	6,22
Fósforo (Bray II)	ppm	ZONA 2	68,3
Fósforo (Bray II)	ppm	ZONA 3	10,3

Nota: Resultados validos para la muestra analizada



ROSA LUDY RODRÍGUEZ R.

Química UIS P.Q 1734

Magister en Química UIS

Máster en Fertilizantes y Medio Ambiente UAM-España