

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

**Caracterización de comunidades fúngicas asociadas a una
turbera del páramo andino**

Karla Micaela Torres Bonilla

Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera en Biotecnología

Quito, 18 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Caracterización de comunidades fúngicas asociadas a una turbera del
páramo andino**

Karla Micaela Torres Bonilla

Nombre del profesor, Título académico

María de Lourdes Torres, Ph.D.

Nombre del profesor, Título académico

Esteban Suárez, Ph.D.

Quito, 18 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Karla Micaela Torres Bonilla

Torres Bonilla Código: 00321103

Cédula de identidad: 1721405098

Lugar y fecha: Quito, 18 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Las turberas andinas son ecosistemas dinámicos y ricos en carbono, que albergan una gran diversidad de hongos. El objetivo de este estudio fue caracterizar las comunidades fúngicas de una turbera restaurada, en el páramo andino del Ecuador, analizando la diversidad y composición de los hongos a dos profundidades de muestreo (10 y 50 cm) y tres niveles freáticos (superficial, intermedio y bajo). Los resultados muestran que la diversidad fúngica es mayor a 50 cm de profundidad. En el caso del nivel freático no se observó diferencias significativas en la diversidad entre los diferentes niveles. La composición fúngica también varía notablemente según la profundidad de muestreo, con órdenes como Hipocreales predominando a 10 cm, y Capnodiales, Lulworthiales y Pleosporales siendo más abundantes a 50 cm. En cuanto al análisis funcional, se clasificaron los hongos según los modos tróficos que indican como obtienen sus nutrientes. Se encontró que a 50 cm predominan los saprótrofos, mientras que a 10 cm se observa mayor abundancia de patótrofos y simbiótrofos. Se observaron también diferencias en la composición fúngica entre niveles freáticos, destacando Rozellomycota en el nivel superficial, y Agaricales y Archaeorhizomycetales en niveles bajos e intermedios. Asimismo, el análisis funcional de los hongos, según el modo trófico, para el factor del nivel freático evidenció la predominancia de saprótrofos en todos los niveles y el favorecimiento de patótrofos en condiciones húmedas. Estos resultados resaltan la importancia de las capas del suelo y del nivel freático en la composición de las comunidades fúngicas, así como el rol importante que podrían estar cumpliendo estos organismos en las turberas andinas del Ecuador.

Palabras clave: Turberas andinas, comunidades fúngicas, profundidad, nivel freático y diversidad fúngica.

ABSTRACT

Andean peatlands are dynamic, carbon-rich ecosystems that host a great diversity of fungi. The aim of this study was to characterize the fungal communities of a restored peatland in the Andean paramo of Ecuador, analyzing the diversity and composition of fungi at two sampling depths (10 and 50 cm) and three water tables (superficial, intermediate and low). The results show that fungal diversity is greater at 50 cm of depth. In the case of the water table, no significant differences in diversity were observed between the different levels. Fungal composition also varies significantly according to sampling depth, with orders such as Hypocreales predominating at 10 cm, and Capnodiales, Lulworthiales and Pleosporales being more abundant at 50 cm. As for the functional analysis, the fungi were classified according to the trophic modes that indicate how they obtain their nutrients. It was found that at 50 cm saprotrophs predominate, while at 10 cm a greater abundance of pathotrophs and symbiotrophs is observed. Differences in fungal composition were also observed between water tables, with Rozellomycota standing out at the surface level, and Agaricales and Archaeorhizomycetales at low and intermediate levels. Likewise, the functional analysis of the fungi found, according to the trophic mode, for the water table factor showed the predominance of saprotrophs at all levels and the favoring of pathotrophs in humid conditions. These results highlight the importance of the soil layers and the water table in the composition of fungal communities, as well as the important role that these organisms could be playing in the Andean peatlands of Ecuador.

Keywords: Andean peatlands, fungal communities, depth, water table and fungal diversity.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
MÉTODOS	15
Diseño experimental y toma de muestras	15
Extracción de ADN, cuantificación y secuenciamiento.....	15
Procesamiento de lecturas y asignación taxonómica de ASVs.....	16
Análisis de composición fúngica	16
Análisis de beta diversidad	16
Análisis de alfa diversidad	16
Análisis de funcionalidad.....	17
RESULTADOS	18
Análisis de alfa diversidad	18
Composición fúngica entre profundidades de muestreo	18
Análisis de beta diversidad entre profundidades de muestreo	18
Análisis funcional de hongos a 10 y 50 centímetros de profundidad	19
Análisis de composición fúngica según el nivel freático.....	19
Análisis de beta diversidad entre niveles freáticos para cada profundidad de muestreo	20
Análisis funcional de hongos según el modo trófico entre niveles freáticos.....	20
DISCUSIÓN	22
Impacto de la profundidad de muestreo y el nivel freático en la diversidad	22
La composición fúngica varía según la profundidad de muestreo.....	22
Funciones de las comunidades fúngicas a diferentes profundidades de suelo.....	23
La composición fúngica varía según el nivel freático	23
Diferencias funcionales de las comunidades fúngicas entre niveles freáticos.....	25
CONCLUSIONES	26
TABLAS	27
FIGURAS	29
REFERENCIAS.....	34
ANEXOS	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índice de alfa diversidad de las muestras colectadas a dos profundidades de muestreo.	27
Tabla 2. Índice de alfa diversidad de las muestras colectadas en tres niveles freáticos a 10 y 50 centímetros.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición y análisis de beta diversidad de las muestras a dos profundidades de muestreo y tres niveles freáticos.	29
Figura 2. Número de ASVs fúngicos agrupados por modo trófico a 10 y 50 centímetros de profundidad.	30
Figura 3. Abundancia relativa de los órdenes de hongos más abundantes a dos profundidades de muestreo y tres niveles freáticos.	31
Figura 4. Beta diversidad de las comunidades fúngicas a 10 y 50cm y niveles de agua bajo, intermedio y superficial.	32
Figura 5. Número de ASVs fúngicos en cada nivel freático agrupados por modo trófico a 10 y 50 centímetros de profundidad.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Turbera restaurada dividida en los nueve sitios de muestreo	41
Anexo 2. Gráfico de los tres niveles freáticos y las dos profundidades de muestreo en la turbera.	42

INTRODUCCIÓN

Las turberas, también conocidas como humedales de turba, son un tipo de ecosistema húmedo en el que se produce de manera continua materia orgánica en descomposición. Esta materia orgánica es producida por plantas que están adaptadas a vivir en lugares con una baja concentración de oxígeno y una alta saturación de agua. La acumulación de este tipo de materia, debido al alto contenido de agua que ralentiza su descomposición, permite con el tiempo la formación de lo que se conoce como turba (Pancorbo et al., 2020). La vegetación que se encuentra aquí se distingue de aquella que se halla en otro tipo de ecosistema de las zonas cercanas. Uno de los factores que determina el tipo de vegetación que se puede desarrollar es el tipo de fuente de agua que llega a cada turbera. En el Ecuador, es posible identificar tres grandes tipos de turberas en el páramo conocidas como turberas de almohadillas, turberas de gramíneas y musgos, y turberas de juncos y ciperáceas (Suárez et al., 2022).

Una de las características principales de este tipo de ecosistemas es que a pesar de que cubren tan solo el 3% de la superficie terrestre, las turberas almacenan aproximadamente una tercera parte del carbono orgánico que se encuentra en el suelo. Por esta razón, tienen un rol fundamental en el ciclo del carbono (Huaman et al., 2020).

Además de fijar una gran cantidad de carbono, estos humedales son importantes para la conservación de la biodiversidad, ya que son refugio de varias especies de flora y fauna que son inusuales en otros ecosistemas (Suárez et al., 2022). Igualmente, regulan el ciclo del agua ya que al retenerla se encargan de liberarla de manera gradual hacia las cuencas. Incluso son utilizadas como fuente de suministro de agua para varias poblaciones andinas. Esto es posible debido a la estructura característica de las turberas por la que pueden filtrar el agua eliminando sedimentos y contaminantes que pueden llegar a ser nocivos en caso de consumirlos (Spda, 2022). Esta capacidad de retención del agua permite a estos ecosistemas regular la humedad del ambiente, por lo que las turberas pueden proporcionar un microclima estable que favorezca

a diferentes ecosistemas cercanos. Finalmente, la acumulación de la turba a lo largo de los años sirve como registro paleoambiental para diversos estudios ambientales y arqueológicos (Joosten, 2003).

A pesar de los roles fundamentales que llevan a cabo las turberas, éstas son consideradas actualmente como uno de los ecosistemas más vulnerables a las actividades antropogénicas y al cambio climático. Dentro de las actividades que se consideran una amenaza para este ecosistema está el sobrepastoreo, la agricultura, construcción de caminos, las sequías, el drenaje de turberas, y la extracción de la turba (Carevic et al., 2017; Huaman et al., 2020).

Las sequías son uno de los efectos del cambio climático a nivel mundial. Al haber sequía en los suelos andinos cercanos a turberas se pone en peligro sus funciones ecológicas (Carevic et al., 2017). Esto se debe principalmente a la disminución del nivel freático, menor acumulación de materia orgánica y pérdida de la biodiversidad presente en este tipo de humedales (Carevic et al., 2017). Así mismo, la turba es considerada materia prima de gran interés comercial ya que a partir de ella es posible elaborar combustible fósil, usarla como aislante térmico o incluso en horticultura para retener nutrientes en el suelo (Joosten, 2003). Por ende, estos ecosistemas se han visto destruidos al dejarlos prácticamente sin materia orgánica o turba disponible con la cuál cumplir sus funciones.

En Ecuador, el drenaje es una de las formas de alteración de las turberas con mayor impacto ecológico. Esto se debe a que el drenaje es un requisito para convertir este tipo de suelo húmedo en un suelo apto para otras actividades de interés antropogénico (Suárez et al., 2022). Este drenaje da lugar a sequías en los suelos del páramo andino, incendios, erosión del suelo, emisión de los gases de efecto invernadero acumulados, pérdida de biodiversidad, hundimiento de tierras, y reducción de la calidad del agua superficial (Barthelmes & Joosten, 2018).

Considerando el impacto de estas actividades en las turberas y su rol fundamental en el ciclo del carbono, es interesante investigar acerca de los hongos. Estos organismos desarrollan roles ecológicos de gran importancia que contribuyen a la productividad, funcionamiento y estabilidad de las turberas andinas. En primer lugar, se encuentra la descomposición de materia orgánica que permite la liberación de nutrientes para su aprovechamiento por otros organismos. Además, algunos tipos de hongos tienen la capacidad de establecer relaciones simbióticas con las plantas que se encuentran en el entorno (micorrizas). Es así como permiten a las plantas obtener nutrientes, como el nitrógeno y fósforo, en las condiciones particulares de las turberas, mientras los hongos se benefician al recibir carbohidratos y otros compuestos orgánicos producidos por las plantas (Harley, 1971; Heredia-Abarca, 2020).

Generalmente, los hongos se clasifican de acuerdo a su estrategia de alimentación en tres modos tróficos. Los modos tróficos corresponden a hongos patótrofos, simbiótrofos y saprótrofos. Los patótrofos o patógenos son aquellos que obtienen sus nutrientes al invadir otro organismo vivo, dañando sus tejidos en el proceso. Por otro lado, los simbiótrofos son aquellos que establecen una asociación, con otro organismo, que resulta beneficiosa para ambos. Finalmente, los hongos saprótrofos son aquellos que se alimentan de materia orgánica que se encuentra en descomposición. Estos son muy importantes para el ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Gómez, 2018).

Es así como la descripción de la diversidad de las turberas se ha vuelto un enfoque relevante para conocer más acerca de estos ecosistemas complejos. Por lo general, la diversidad fúngica de las turberas del páramo andino en Sudamérica está conformada por hongos de los órdenes Dothideales, Hypocreales, Helotiales, Capnodiales, Mortierellales, Mucorales y Eurotiales (Paredes, 2015).

En el Ecuador, no existe información acerca de los hongos en ecosistemas como las turberas, por lo que el objetivo de este estudio fue caracterizar las comunidades fúngicas

asociadas a una turbera andina a dos profundidades de muestreo y tres niveles freáticos distintos en la provincia de Pichincha. Al caracterizar las comunidades de hongos encontradas en estos ecosistemas del páramo, se espera comprender el rol de estos organismos en los procesos ecológicos de las turberas. Los resultados de esta investigación podrían contribuir al conocimiento de la diversidad de hongos, los roles que cumplen en estos sitios, y el impacto que las alteraciones climáticas y actividades antropogénicas tienen sobre su diversidad y funcionalidad.

MÉTODOS

Diseño experimental y toma de muestras

Para esta investigación se recolectaron muestras de una turbera restaurada, ubicada en la Reserva Chakana de la Fundación Jocotoco, en la provincia de Pichincha (latitud: -0.4457031, longitud: -78.3076068).

La recolección de las muestras se realizó en septiembre del 2021. Para el experimento, se establecieron nueve sitios o parcelas a lo largo de la turbera (**Anexo 1**). Uno de los factores considerados es el nivel freático que es la profundidad a la que el agua subterránea empieza a aparecer en el suelo. Por lo que en un nivel bajo el agua no llega a la capa de la turba, luego está el nivel intermedio que está medianamente inundado, y el superficial en el que la turbera está completamente saturada de agua (**Anexo 2**). De esta manera, dentro de los 9 sitios tres tenían un nivel freático superficial, tres uno intermedio y tres uno bajo. En cada uno de estos sitios se clavó un barreno de 60 centímetros en el suelo, se extrajo la capa de tierra y se removió la cobertura vegetal. Posteriormente, se tomó la muestra de suelo a 10 centímetros y otra correspondiente a una profundidad de 50 centímetros. De esta manera, se tomaron 8 muestras en cada sitio, recolectando un total de 72 muestras.

Extracción de ADN, cuantificación y secuenciamiento

Para la extracción de ADN de cada una de las muestras de suelo se utilizó el kit DNeasy® PowerSoil® Pro de QIAGEN (2023). El ADN extraído se cuantificó utilizando el equipo Qubit 3 y el Nanodrop 2000 se usó para la evaluación de la calidad de ADN. Posteriormente, las muestras de ADN genómico fueron enviadas a Genome Québec Innovation Centre en McGill University para el secuenciamiento de la región ITS1. La plataforma utilizada para la secuenciación fue NextSeq 2x3000 de Illumina.

Procesamiento de lecturas y asignación taxonómica de ASVs

Una vez secuenciadas las muestras de ADN, se procesaron las lecturas obtenidas para revisar su calidad, corregir errores de secuenciación y juntar las lecturas formando secuencias consenso. Posteriormente, se construyeron los ASVs (Amplicon Sequence Variants) y se realizó la asignación taxonómica de los mismos con la base de datos UNITE v10.0 (2024). Adicionalmente, se eliminaron las lecturas que no fueron clasificadas taxonómicamente o que no fueron clasificadas como hongos y se realizó una rarefacción a 115000 lecturas en cada muestra. Este procesamiento de lecturas y asignación taxonómica de los ASVs se realizó por medio del paquete de software Mothur v1.48.1 (2024).

Análisis de composición fúngica

A partir de los conteos de ASVs se determinó la abundancia relativa a nivel de orden fúngico en las diferentes muestras. Se utilizó el paquete Ohchibi v0.0.0.9000 y AMOR v0.2-2 para este análisis (rdrr.io, 2023; Salas Gonzalez, 2019). Se obtuvieron los gráficos correspondientes a la abundancia relativa de los diferentes órdenes de hongos a 10 y 50 centímetros de profundidad, y a tres niveles freáticos.

Análisis de beta diversidad

Para los análisis de beta diversidad se realizó una matriz de disimilitud de Bray-Curtis, cuyos resultados se graficaron mediante un CAP (“Canonical analysis of principal coordinates”). Posteriormente, se realizó la prueba estadística PERMANOVA que permite establecer la varianza explicada por el factor de profundidad de muestreo y el nivel freático mediante R^2 y su significancia estadística mediante un valor p. Estos análisis se llevaron a cabo mediante el uso del paquete Ohchibi v0.0.0.9000 (Salas Gonzalez, 2019).

Análisis de alfa diversidad

Se calculó el índice de alfa diversidad de Shannon utilizando el paquete Vegan v2.6-6.1 (Oksanen, et al., 2024). A partir de los valores obtenidos, se realizó una comparación entre los

factores de profundidad de muestreo y niveles freáticos. Adicionalmente, la significancia estadística de estas diferencias se evaluó mediante una prueba t, ANOVA y prueba de Tukey. La prueba de Tukey se utilizó para comparar las medias individuales de las capas freáticas.

Análisis de funcionalidad

Finalmente, se realizó un análisis de funcionalidad de los ASVs correspondientes a las muestras analizadas. Los ASVs se clasificaron en grupos funcionales según su modo trófico. Se utilizó la base de datos de FUNGuild v1.1 para la asignación de estos grupos funcionales en base a la taxonomía de los ASVs (Nguyen et al., 2016). Este análisis se llevó a cabo para un subset de muestras de 10 vs. 50 centímetros, un subset de los niveles freáticos a 10 centímetros, y otro para los niveles freáticos a 50 centímetros. Después, se elaboraron gráficos del número de ASVs por cada uno de los grupos funcionales utilizando el paquete ggplot2 v3.5.0 (Van Den Brand, 2024).

RESULTADOS

Análisis de alfa diversidad

En la **Tabla 1** se evidencia que la diversidad es mayor a 50 cm ya que el índice de Shannon a esta profundidad es de 3.562 y a 10 cm es de 3.234. Además, al realizar la prueba t se encontró que las diferencias entre profundidades sí son significativas para todos los índices al presentar un valor p menor al valor de alfa de 0.05.

En la **Tabla 2** se observa que el nivel superficial presenta mayor diversidad según el índice de Shannon que es de 3.576 a 10 cm y 3.700 a 50 cm. Sin embargo, el ANOVA y la prueba de Tukey mostraron que no existen diferencias significativas entre las medias de los tres niveles freáticos a 10 y 50 cm de profundidad.

Composición fúngica entre profundidades de muestreo

En la **Figura 1A** se encontró que ambas profundidades comparten los 17 órdenes fúngicos más abundantes. Tanto a 10 como a 50 cm, un orden no clasificado de Ascomycota es el más abundante. Asimismo, se observa una diferencia en las abundancias relativas de los diferentes órdenes al comparar ambas profundidades. De esta manera, “Fungi no clasificado” e Hipocreales tienen una abundancia mayor a 10 cm que a 50 cm. Igualmente, los órdenes Capnodiales, Lulworthiales, Pleosporales y Tremellales son notoriamente más abundantes a una mayor profundidad de muestreo.

Análisis de beta diversidad entre profundidades de muestreo

Por otro lado, en la **Figura 1B**, se evidencia un gráfico CAP de los factores de nivel freático y profundidad de muestreo. Se observa que las muestras correspondientes a 50 centímetros se agrupan en la parte izquierda del gráfico y las muestras de 10 cm en la parte derecha. Igualmente, se evidencia que el nivel freático superficial se separa de los otros dos niveles que se encuentran agrupados a 10 y 50 cm de profundidad. Adicionalmente, es posible establecer que el factor que tiene un mayor efecto en la composición de las muestras es la

profundidad de muestreo ya que su valor de R^2 es de aproximadamente 8% y el del nivel freático es de aproximadamente 7%. Es posible también determinar que ambos factores tienen un impacto significativo en la composición, al tener un valor p menor al valor alfa de 0.05.

Análisis funcional de hongos a 10 y 50 centímetros de profundidad

En la **Figura 2** se observa que a 10 centímetros de profundidad existe un mayor número de hongos patótrofos y simbiótrofos. En cambio, en el caso de los saprótrofos, el conteo es mayor a 50 centímetros. Al comparar los modos tróficos, se evidencia que el más prevalente en ambas profundidades es el de los saprótrofos y el menos prevalente el de los simbiótrofos. Finalmente, se observa que en general hay un mayor número de hongos que no se asignan dentro de ningún modo trófico.

Análisis de composición fúngica según el nivel freático

En la **Figura 3** se observa que el orden más abundante en todos los casos corresponde a uno no clasificado dentro del filo Ascomycota ya que representa aproximadamente entre el 20 y 60% de la abundancia relativa de todos los niveles freáticos. Se evidencia que su abundancia tiende a reducirse a medida que el nivel freático aumenta de bajo a superficial.

En la **Figura 3A** se encontró que sí existen diferencias en la composición fúngica entre capas freáticas a 10 centímetros. El nivel superficial tiene una abundancia relativa de Archaeorhizomycetales notablemente menor a comparación de los demás niveles freáticos. También, se evidencia que en este nivel Agaricales, Hypocreales, Pleosporales y Sordariales son más abundantes que en el nivel bajo e intermedio. Por otro lado, en el nivel intermedio un orden no clasificado dentro del filo Basidiomycota tiene una mayor abundancia en comparación con las otras capas freáticas.

En cambio, en el caso de la profundidad de 50 centímetros (**Figura 3B**), se evidencia que la abundancia relativa de Agaricales aumenta del nivel bajo al nivel superficial. El nivel intermedio tiene una mayor abundancia de los órdenes Capnodiales, Lulworthiales,

Pleosporales y Tremellales. En la capa superficial se evidencia una mayor abundancia relativa del orden no clasificado de Rozellomycota. Finalmente, en el nivel bajo se observa una mayor abundancia de un orden no clasificado de Ascomycota y de Archaeorhizomycetales en comparación con las otras capas freáticas.

Análisis de beta diversidad entre niveles freáticos para cada profundidad de muestreo

En la **Figura 4A** se observa en el CAP que las muestras de 10 centímetros de profundidad se distribuyen en base a los niveles freáticos. En este caso se evidencia que la mayoría de las muestras correspondientes al nivel superficial se agrupan en la esquina inferior izquierda, las del nivel bajo en la esquina inferior derecha y las del nivel intermedio en la parte superior del gráfico. En este caso es posible establecer que el factor de nivel freático tiene un efecto significativo de alrededor del 11% en la composición de las comunidades.

En la **Figura 4B** se encuentran las muestras de 50 centímetros agrupadas según los diferentes niveles freáticos. Al igual que en la **Figura 4A**, las muestras se encuentran separadas según el nivel freático, pero la separación de las muestras es más clara. Las del nivel bajo se encuentran agrupadas en la esquina inferior derecha, las del nivel superficial en la esquina inferior izquierda y las del nivel intermedio en la parte superior del plano. A 50 cm de profundidad, el nivel freático tiene un efecto significativo de aproximadamente el 13% en la composición de las comunidades. Que resulta ser mayor que el efecto encontrado a 10 cm de profundidad que tiene un efecto de aproximadamente el 11%.

Análisis funcional de hongos según el modo trófico entre niveles freáticos

En la **Figura 5** se evidencia que en los tres niveles freáticos el modo trófico con un mayor conteo es el de los saprótrofos. Asimismo, el número de hongos saprótrofos, patótrofos y simbiótrofos aumenta a medida que el nivel de agua crece. En el caso de los saprótrofos, su conteo aumenta de 275 a 325 aproximadamente. Los patótrofos aumentan de 100 a 125 aproximadamente. Igualmente, el aumento de hongos simbiótrofos es de 60 a 90

aproximadamente. Por último, tanto a una profundidad de 10 como de 50 centímetros, se encontró que la capa superficial tiene un mayor número de ASVs sin asignar.

DISCUSIÓN

Impacto de la profundidad de muestreo y el nivel freático en la diversidad

La **Tabla 1** muestra una mayor diversidad fúngica a 50 cm, lo que podría deberse a la acumulación de materia orgánica parcialmente descompuesta que conforma la turba, proporcionando diversos sustratos para la descomposición fúngica (Díaz et al., 2015; Universidad de Cantabria, s. f.). Además, a mayor profundidad, la humedad es más estable, favoreciendo la supervivencia y diversidad, en contraste con las capas superficiales de suelo, donde la temperatura y humedad varían constantemente (Zegers et al., 2006).

Por otro lado, la **Tabla 2** muestra que el nivel freático no tiene un efecto significativo en la diversidad de los hongos en ambas profundidades según el índice de Shannon. Esto podría deberse a la capacidad de los hongos en estos ecosistemas para tolerar diferentes niveles de saturación de agua y humedad (Andersen et al., 2012).

La composición fúngica varía según la profundidad de muestreo

En la **Figura 1A**, en ambas profundidades, el orden más abundante es uno no clasificado dentro de Ascomycota. Según Thormann (2006) el filo Ascomycota es el más común en las turberas debido a su adaptabilidad y versatilidad metabólica, lo que le permite descomponer desde materia superficial hasta compuestos complejos en capas profundas (Tedersoo et al., 2014; Barghoorn & Linder, 1944). Asimismo, a 10 cm predominan los Hipocreales, que incluyen especies patógenas oportunistas y simbióticas que prosperan con mayor acceso a oxígeno y materia orgánica fresca. (Kubicek et al., 2008). En cambio, a 50 cm destacan Capnodiales, Lulworthiales, Pleosporales y Tremellales. Los Capnodiales y Pleosporales están adaptados para descomponer materia orgánica recalcitrante o compleja y pueden crecer mejor a una mayor profundidad donde esta se acumula (Thormann, 2006). De igual manera, los Lulworthiales descomponen celulosa en condiciones de baja concentración de oxígeno y alta humedad (Richards et al., 2012). Finalmente, se conoce que Tremellales

prosperan en ambientes húmedos y estables, típicos de capas más profundas de suelo (Fell, 2012).

En la **Figura 1B**, el gráfico CAP muestra diferencias en la composición de comunidades según la profundidad de muestro y el nivel freático. Se evidencia que la profundidad tiene un mayor efecto sobre las comunidades fúngicas y en menor medida influye el nivel freático. La profundidad de muestreo influye en la composición microbiana de este tipo de ecosistema ya que la humedad, disponibilidad de nutrientes y tipo de materia orgánica varían afectando la diversidad y funcionalidad microbiana más que el nivel de agua (Dove et al., 2021). Adicionalmente, factores como el contenido de carbono orgánico disuelto, cantidad de nitrógeno total, nutrientes disponibles y pH varían significativamente con la profundidad, lo que influye directamente en la composición microbiana (Kitson & Bell, 2020; Zhao et al., 2022).

Funciones de las comunidades fúngicas a diferentes profundidades de suelo

En la **Figura 2** se evidencia que a una menor profundidad hay un mayor número de hongos patótrofos y simbiótrofos. Esto puede deberse a que a menor profundidad de la turbera existe un mayor número de plantas y materia vegetal con la que pueden establecer una patogénesis o relación simbiótica (Smith & Read, 2008). Asimismo, a una profundidad de 50 cm existe un conteo mayor de los saprótrofos. Esto se puede deber a la mayor acumulación de materia orgánica en descomposición, creando un ambiente ideal para el crecimiento de hongos especializados en su degradación (Thormann et al., 2004). Además, se ha reportado que en las capas más profundas de las turberas existe una mayor acumulación de materia orgánica en descomposición (Szajdak et al., 2020).

La composición fúngica varía según el nivel freático

En la **Figura 3A y 3B**, el orden más abundante es uno no clasificado dentro del filo Ascomycota, filo comúnmente reportado en turberas (Thormann, 2006). A 10 cm, su

abundancia disminuye al aumentar el nivel freático, probablemente porque estos hongos requieren más oxígeno, y el agua genera anaerobiosis (Kubicek & Druzhinina, 2007). Lo mismo ocurre con los Archaeorhizomycetales que disminuyen a medida que aumenta el nivel de agua (Rousk et al., 2010). En cambio, los Hypocreales y Pleosporales son más abundantes en capas superficiales por su adaptación a ambientes húmedos (Thormann, 2006). Finalmente, a nivel intermedio, se observa mayor abundancia de un orden de Basidiomycota, los cuales prosperan en condiciones equilibradas de humedad (Kubicek & Druzhinina, 2007).

De igual manera, a 50 cm, el orden Agaricales aumenta con un mayor nivel freático, posiblemente esto se deba a que están adaptados a bajas concentraciones de oxígeno y una elevada humedad que se encuentra en niveles con una mayor saturación de agua. En el nivel intermedio, los Capnodiales, Lulworthiales, Pleosporales y Tremellales son más abundantes, al estar asociados a suelos húmedos y anaeróbicos (Osono, 2007; Richards et al., 2012). Además, es importante considerar que, a una mayor profundidad, la humedad es mayor, por lo que un nivel de saturación intermedio podría ser óptimo para su proliferación y puede no ser necesario un nivel freático superficial. Por otro lado, en la capa superficial, destaca un orden no clasificado de Rozellomycota, filo que contiene hongos adaptados a condiciones acuáticas. Por último, en el nivel bajo, Archaeorhizomycetales y Ascomycota son más abundantes, probablemente debido a que están adaptados a ambientes con más oxígeno y menor humedad como en suelos menos saturados de agua (Rousk et al., 2010).

Los gráficos CAP de la **Figura 4** muestran diferencias en la composición fúngica a 10 y 50 cm según el nivel freático. Estas diferencias pueden deberse principalmente a las variaciones en la concentración de oxígeno según las capas freáticas. Debido principalmente a que en los niveles saturados de agua se genera anaerobiosis por lo que la concentración de oxígeno es baja a comparación de un nivel con menor saturación de agua. Lo que va a limitar

el crecimiento de hongos estrictamente aeróbicos y favorecer a aquellos adaptados a condiciones anaeróbicas.

Diferencias funcionales de las comunidades fúngicas entre niveles freáticos

La **Figura 5** muestra que predominan los saprótrofos, probablemente por la acumulación de materia y su adaptación a bajas concentraciones de oxígeno (Dighton, 2003). En el caso de los patótrofos, estos se ven favorecidos por un ambiente húmedo que facilita la dispersión de esporas y colonización de sus hospedadores. Finalmente, el conteo de simbiótrofos no varía notoriamente, probablemente porque pueden sobrevivir en una alta o baja saturación de agua (Kubicek & Druzhinina, 2007; Armstrong & Armstrong, 2005). Asimismo, se ha observado que los simbiótrofos (como las micorrizas arbusculares) pueden adaptarse a distintos niveles de saturación de agua, desde suelos anegados hasta secos, siempre que haya raíces de plantas disponibles para establecer relaciones simbióticas. En suelos saturados de agua, aprovechan las condiciones anaeróbicas para acceder a nutrientes a través de las plantas (Abdalla et al., 2023; Wang et al., 2022).

CONCLUSIONES

Este estudio representa un avance importante en la investigación de los ecosistemas de turberas en Ecuador, al ser el primero en caracterizar las comunidades fúngicas asociadas a diferentes profundidades de muestreo y niveles freáticos en estos sitios. Dado que las turberas cumplen un rol crucial en la captura de carbono y la regulación hídrica, la comprensión de sus comunidades microbianas es fundamental para evaluar sus funciones ecológicas y el impacto de las perturbaciones ambientales que enfrentan.

Los resultados obtenidos muestran que tanto la profundidad de muestreo como el nivel freático influyen en la diversidad y composición fúngica. A 50 centímetros de profundidad se encontró una mayor diversidad fúngica, mientras que las comunidades cambian significativamente entre capas de suelo y niveles freáticos. Además, en el análisis funcional de los hongos se evidencia que existe un predominio de saprótrofos a 50 centímetros y a un nivel freático superficial. Asimismo, los patótrofos y simbiótrofos fueron más abundantes a 10 centímetros y a un nivel freático superficial. A partir de los resultados obtenidos es posible ver que existe una interacción entre los hongos y su entorno, contribuyendo a un mejor entendimiento de los factores que determinan la diversidad fúngica en las turberas andinas.

Por lo tanto, este estudio permite entender el impacto de factores ambientales como la profundidad y nivel freático en la composición fúngica de las turberas. También, a partir de estos resultados se podría evidenciar el posible impacto de cambios en el nivel freático en este tipo de ecosistemas. Principalmente el que se puede dar por el cambio climático o el drenaje de agua para actividades antropogénicas. Finalmente, estos resultados nos permiten establecer una base sólida para continuar investigando las dinámicas microbianas de las turberas.

TABLAS

Tabla 1. Índice de alfa diversidad de las muestras colectadas a dos profundidades de muestreo.

Índices de alfa diversidad	Profundidad de muestreo		Valor p
	10cm	50cm	
Shannon	3.234	3.562	0.046

Se presenta el valor de la media del índice de Shannon para cada profundidad de muestreo. Se presenta el valor p de la prueba t. En naranja se indica la comparación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 2. Índice de alfa diversidad de las muestras colectadas en tres niveles freáticos a 10 y 50 centímetros.

10 cm							
Índices de alfa diversidad	Niveles freáticos			Valor p	Prueba post-hoc de Tukey		
	Bajo	Intermedio	Superficial		Bajo	Intermedio	Superficial
Shannon	2.917	3.209	3.576	0.059	NS	NS	NS
50 cm							
Índices de alfa diversidad	Niveles freáticos			Valor p	Prueba post-hoc de Tukey		
	Bajo	Intermedio	Superficial		Bajo	Intermedio	Superficial
Shannon	3.524	3.460	3.700	0.059	NS	NS	NS

Se evidencia el valor de la media del índice de Shannon para cada uno de los niveles freáticos a 10 y 50 centímetros. Se presenta el valor p de la prueba estadística ANOVA. Además, para analizar la significancia de la diferencia entre las medias de los niveles freáticos se realizó una prueba post-hoc de Tukey. Las siglas “NS” hacen referencia a comparaciones “no significativas”.

FIGURAS

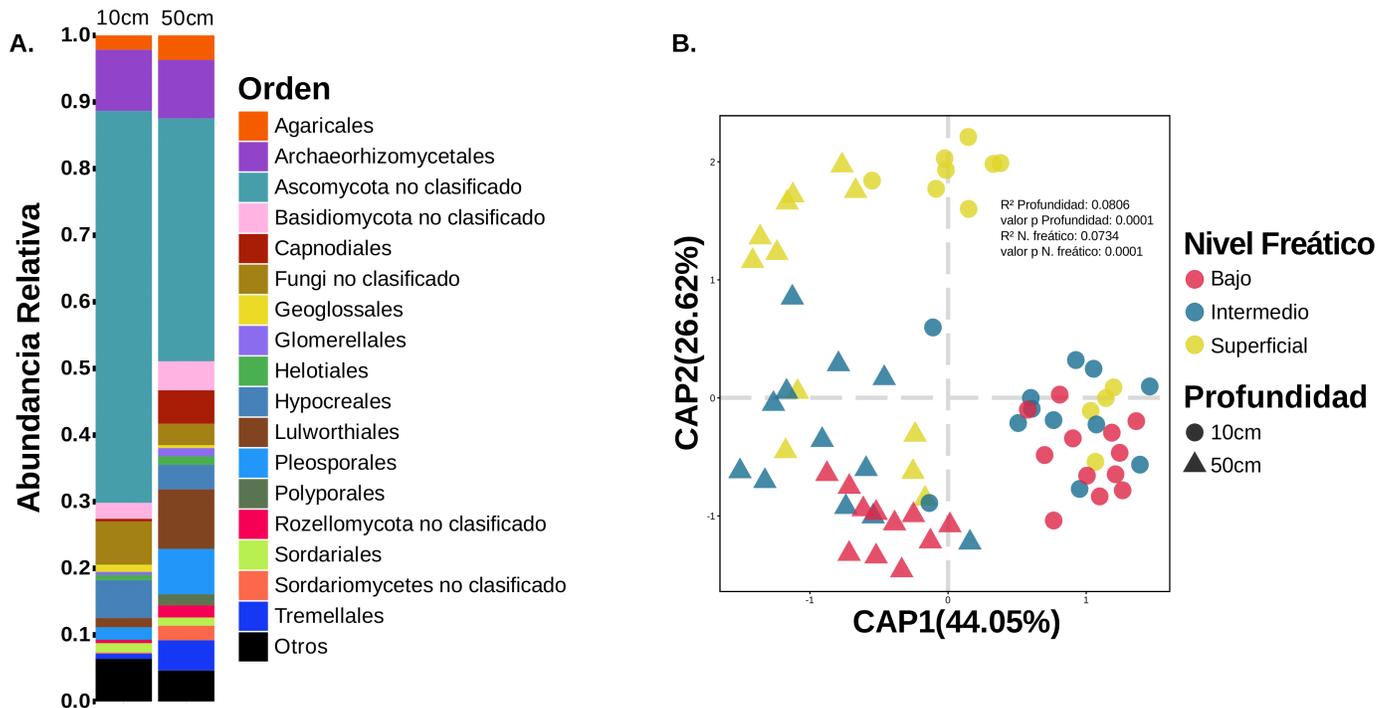


Figura 1. Composición y análisis de beta diversidad de las muestras a dos profundidades de muestreo y tres niveles freáticos.

A) Gráfico de abundancias relativas de los hongos más abundantes a nivel de orden para una profundidad de 10 y 50 centímetros. B) Gráfico CAP en base a una matriz de disimilitud de Bray-Curtis indicando los factores de nivel freático y profundidad. El R^2 indica el porcentaje de la varianza explicado por los factores analizados. El valor p (< 0.05) indica la significancia estadística.

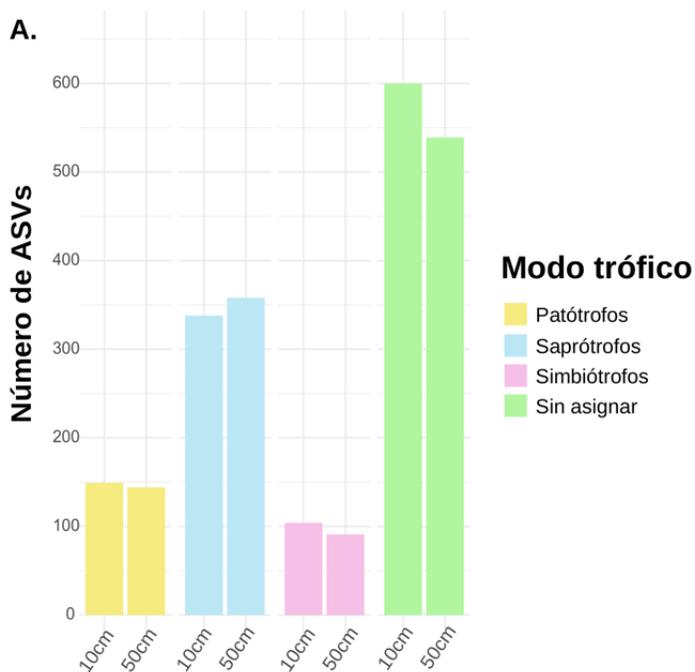


Figura 2. Número de ASVs fúngicos agrupados por modo trófico a 10 y 50 centímetros de profundidad.

Gráfico de barras con el número de ASVs agrupados según cuatro modos tróficos a 10 y 50 centímetros de profundidad.

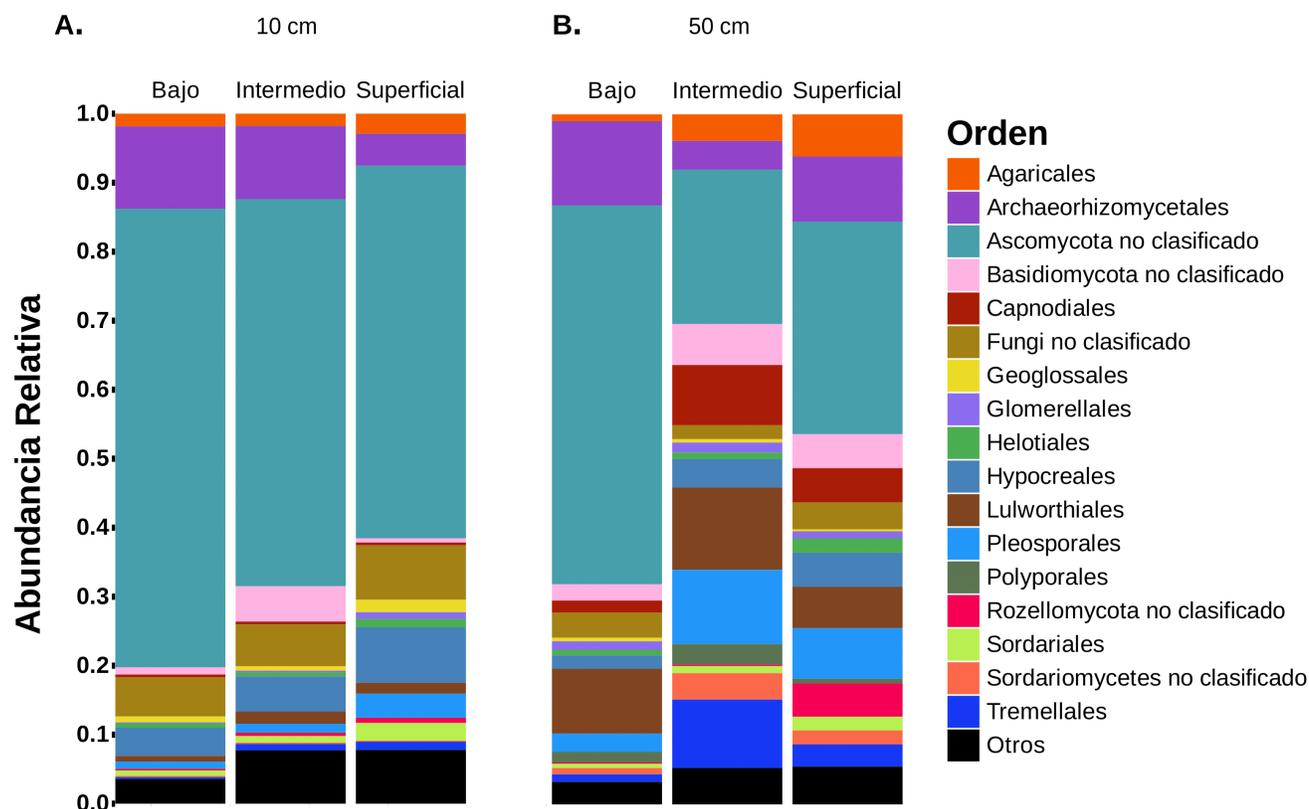


Figura 3. Abundancia relativa de los órdenes de hongos más abundantes a dos profundidades de muestreo y tres niveles freáticos.

A) Gráfico de abundancias relativas de los órdenes fúngicos más abundantes de los niveles freáticos a una profundidad de 10 centímetros. **B)** Gráfico de abundancias relativas de los órdenes fúngicos más abundantes de los niveles freáticos a una profundidad de 50 centímetros.

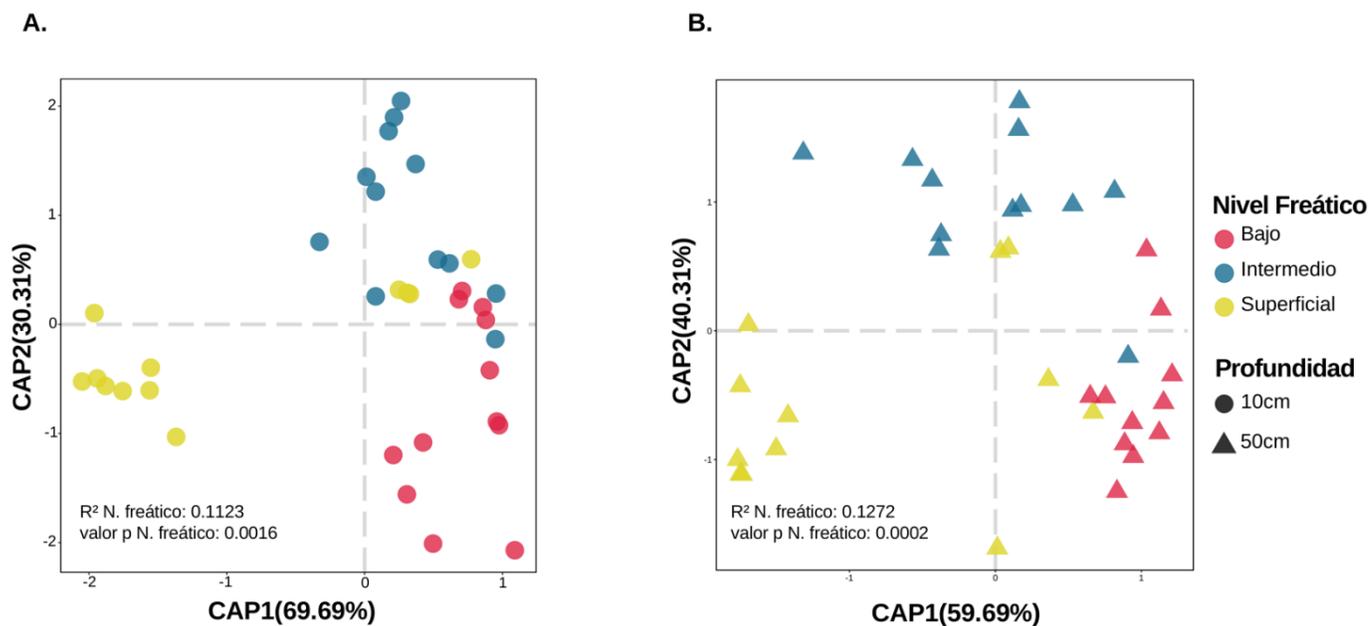


Figura 4. Beta diversidad de las comunidades fúngicas a 10 y 50cm y niveles de agua bajo, intermedio y superficial.

A) Gráfico CAP en base a una matriz de disimilitud de Bray-Curtis indicando el factor de nivel freático a una profundidad de 10 centímetros. El R^2 indica el porcentaje de varianza que este factor explica. El valor p (< 0.05) indica la significancia estadística del efecto del nivel freático. **B)** Gráfico CAP en base a una matriz de disimilitud de Bray-Curtis indicando el factor de nivel freático a una profundidad de 50 centímetros. El R^2 indica el porcentaje de varianza que este factor explica. El valor p (< 0.05) obtenido indica la significancia estadística del efecto del nivel freático.

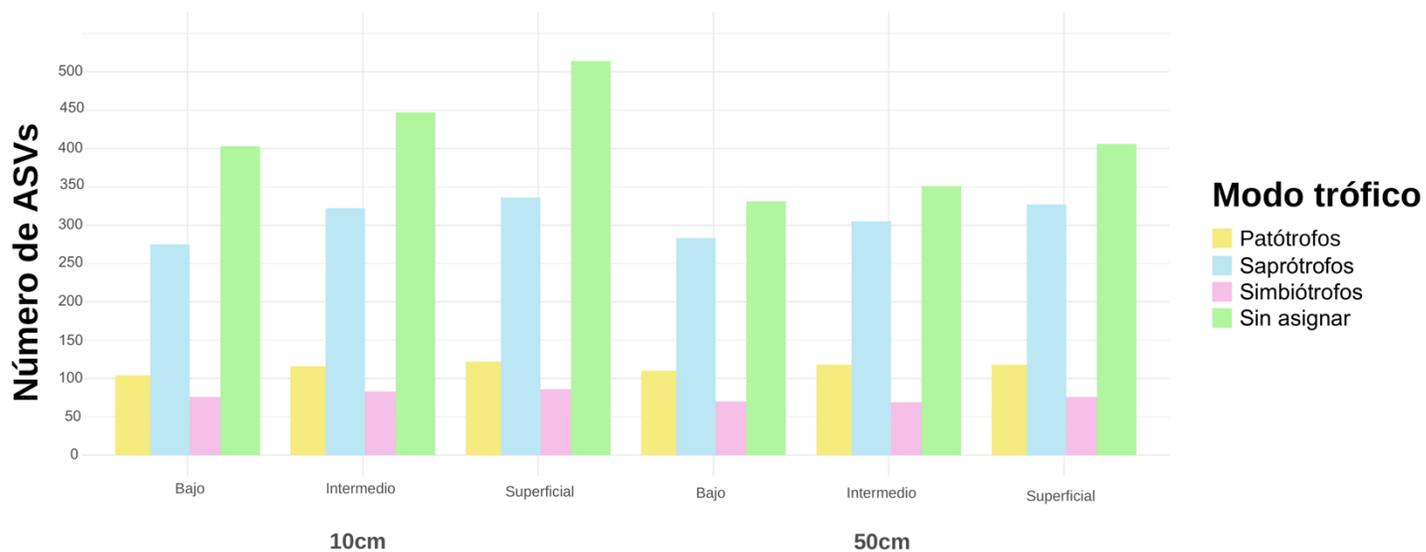


Figura 5. Número de ASVs fúngicos en cada nivel freático agrupados por modo trófico a 10 y 50 centímetros de profundidad.

Gráfico de barras del conteo de ASVs a un nivel freático bajo, intermedio y superficial a 10 y 50 centímetros de profundidad, según cuatro modos tróficos.

REFERENCIAS

- Abdalla, M., Bitterlich, M., Jansa, J., Püschel, D., & Ahmed, M. A. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought. *Journal Of Experimental Botany*, 74(16), 4808-4824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad249>
- Alcolado, P. (1998). Conceptos e índices relacionados con la diversidad. *Avicennia*.
https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Alcolado-2/publication/265963780_Conceptos_e_indices_relacionados_con_la_diversidad/links/54662c150cf25b85d17f5abd/Conceptos-e-indices-relacionados-con-la-diversidad.pdf
- Andersen, R., Chapman, S., & Artz, R. (2012). Microbial communities in natural and disturbed peatlands: A review. *Soil Biology And Biochemistry*, 57, 979-994.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.003>
- Armstrong, J., & Armstrong, W. (2005). Rice: Sulfide-induced Barriers to Root Radial Oxygen Loss, Fe²⁺ and Water Uptake, and Lateral Root Emergence. *Annals Of Botany*, 96(4), 625-638. <https://doi.org/10.1093/aob/mci215>
- Barghoorn, E. S., & Linder, D. H. (1944). Marine Fungi: Their Taxonomy and Biology. *Farlowia A Journal Of Cryptogamic Botany*, 1(3), 395-467. <https://doi.org/10.5962/p.315987>
- Barthelmes, A., & Joosten, H. (2018). Lineamientos para inventarios de turberas tropicales a fin de facilitar su designación como sitios Ramsar. *Ramsar*.
https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn9_peatland_inventory_s.pdf
- Carevic, F. S., Barrientos, E., & Anderson, M. (2017). Bodefales en el norte de Chile: una visión general desde la perspectiva de los rasgos hidráulicos de la vegetación a la conservación biológica. *Idesia, ahead*, 0. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292017005000305>

- Díaz, M., Silva, W., & León, C. (2015). Características de los ecosistemas de turberas factores que influyen en su formación y tipos. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, 33. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/7421fa1e-35aa-49dc-b4d1-c7f3a5f7db41/content>
- Dighton, J. (2003). Fungi in Ecosystem Processes. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9780203911440>
- Dove, N. C., Barnes, M. E., Moreland, K., Graham, R. C., Berhe, A. A., & Hart, S. C. (2021). Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition. *ISME Communications*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>
- Fell, J. (2012). Yeasts in marine environments. En *Marine Fungi* (pp. 91-102). De Gruyter. https://www.researchgate.net/publication/288909618_Yeasts_in_marine_environments
- Gómez, F. (2018). Características generales de los hongos e infecciones sistémicas y oportunistas de las micosis tropicales. *Editorial Médica Panamericana*. https://aula.campuspanamericana.com/_Cursos/Curso01417/Temario/Experto_Med_Tropical/M5T1-Texto.pdf
- Harley, J. L. (1971). Fungi in Ecosystems. *Journal Of Ecology*, 59(3), 653. <https://doi.org/10.2307/2258131>
- Heredia-Abarca, G. (2020). La importancia de los hongos (Fungi) en los servicios ecosistémicos. *Bioagrobiencias*, 13(2). <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/BAC/article/download/3575/1534>
- Huaman, Y., Moreira-Turcq, P., Espinoza, R., Llanos, R., Apaéstegui, J., Turcq, B., & Willems, B. (2020). INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA ACUMULACIÓN

- DE CARBONO EN BOFEDALES ALTOANDINOS DURANTE LOS ÚLTIMOS 2 500 AÑOS. *Ecología Aplicada*, 19(1), 35. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i1.1444>
- Joosten, H. (2003). Wise use of mires: Background and principles. *International Mire Conservation Group And International Peat Society*.
https://www.researchgate.net/publication/293563126_Wise_use_of_mires_Background_and_principles
- Kitson, E., & Bell, N. (2020). The Response of Microbial Communities to Peatland Drainage and Rewetting. A Review. *Frontiers*, 11.
<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.582812/full>
- Kubicek, C. P., Komon-Zelazowska, M., & Druzhinina, I. S. (2008). Fungal genus *Hypocrea*/Trichoderma: from barcodes to biodiversity. *Journal Of Zhejiang University SCIENCE B*, 9(10), 753-763. <https://doi.org/10.1631/jzus.b0860015>
- Kubicek, C., & Druzhinina, I. (2007). Antagonism of Plant Parasitic Nematodes by Fungi. En *Environmental and Microbial Relationships* (Vol. 4, pp. 147-157). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-71840-6_9
- Lutzoni, F., & Miadlikowska, J. (2009). Lichens. *Current Biology*, 19(13).
[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(09\)01033-1](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(09)01033-1)
- Mothur. (2024, 15 mayo). *Version 1.48.1*. GitHub.
<https://github.com/mothur/mothur/releases/tag/v1.48.1>
- Nguyen, N., Song, Z., Bates, S., Branco, S., Tedersoo, L., Menke, J., Schilling, J., & Kennedy, P. (2016). *FUNGuild: parsing OTUs into functional guilds*. GitHub.
<https://github.com/UMNFuN/FUNGuild>

- Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O'Hara, R., Solymos, P., Stevens, M., Szoecs, E., Wagner, H., Barbou, M., Bedwar, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., . . . Weedon, J. (2024). *vegan: an R package for community ecologists*. *Vegan*.
<https://vegandevs.github.io/vegan/>
- Osono, T. (2007). Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research*, 22(6), 955-974. <https://doi.org/10.1007/s11284-007-0390-z>
- Pancorbo, M., Rams, E., Nuutinen, M., Villegas, L., & FAO. (2020, 13 noviembre). *¿Qué son las turberas? La turba en el Perú*. Organizaciones de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/97e7d465-a251-40bf-b791-99447efcfdfd/content>
- Paredes, N. (2015). *Estudio de la diversidad fúngica en turberas compactas del sur de Tierra del Fuego* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata].
<https://api.naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/341af3a4-35e3-4bc1-b791-8e1b57657a85/content>
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800008
- QIAGEN. (2023). *DNeasy PowerSoil Pro Kit Handbook*.
<https://www.qiagen.com/us/resources/resourcedetail?id=9bb59b74-e493-4aeb-b6c1-f660852e8d97&lang=en>

rdr.io. (2023, 21 febrero). *surh/AMOR: Abundance Matrix Operations in R*.

<https://rdr.io/github/surh/AMOR/>

Richards, T. A., Jones, M. D., Leonard, G., & Bass, D. (2012). Marine Fungi: Their Ecology and Molecular Diversity. *Annual Review Of Marine Science*, 4(1), 495-522.

<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100802>

Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P. C., Lauber, C. L., Lozupone, C., Caporaso, J. G., Knight, R., & Fierer, N. (2010). Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME Journal*, 4(10), 1340-1351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>

Salas Gonzalez, I. (2019). *isaisg/ohchibi: iskali (v1.0.0)*. *Zenodo*.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.2593691>

Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3.^a ed.). Academic Press.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780123705266/mycorrhizal-symbiosis>

Spda, W. (2022, 26 marzo). El importante rol de las turberas amazónicas en el proceso de adaptación al cambio climático. *SPDA Actualidad Ambiental*.

<https://www.actualidadambiental.pe/el-importante-rol-de-las-turberas-amazonicas-en-proceso-de-adaptacion-al-cambio-climatico/>

Suárez, E., Chimbolema, S., Jaramillo, R., Hribljan, J., Chimner, R., & Lilleskov, E. (2022).

Turberas de páramo en el Ecuador: notas sobre ecología, conservación, y restauración de un ecosistema estratégico. Imprenta Don Bosco.

https://www.researchgate.net/publication/365676162_Turberas_de_paramo_en_el_Ecuador_notas_sobre_ecologia_conservacion_y_restauracion_de_un_ecosistema_estrategico/link/637e1c4654eb5f547cf8f781/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19

- Szajdak, L. W., Jezierski, A., Wegner, K., Meysner, T., & Szczepański, M. (2020). Influence of Drainage on Peat Organic Matter: Implications for Development, Stability, and Transformation. *Molecules*, 25(11), 2587. <https://doi.org/10.3390/molecules25112587>
- Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N. S., Wijesundera, R., Ruiz, L. V., Vasco-Palacios, A. M., Thu, P. Q., Suija, A., Smith, M. E., Sharp, C., Saluveer, E., Saitta, A., Rosas, M., Riit, T., Ratkowsky, D., Pritsch, K., Põldmaa, K., . . . Abarenkov, K. (2014). Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 346(6213). <https://doi.org/10.1126/science.1256688>
- Thormann, M. N. (2006). Diversity and function of fungi in peatlands: A carbon cycling perspective. *Canadian Journal Of Soil Science*, 86(Special Issue), 281-293. <https://doi.org/10.4141/s05-082>
- Thormann, M., Currah, R., & Bayley, S. (2004). Patterns of distribution of microfungi in decomposing bog and fen plants. *Canadian Journal Of Botany*, 82. <https://doi.org/10.1139/B04-025>
- UNITE. (2024). *rDNA ITS based identification of Eukaryotes and their communication via DOIs*. University Of Tartu, Natural History Museum. <https://unite.ut.ee/>
- Universidad de Cantabria. (s. f.). *Turba y turberas en la Cuera*. UC. <https://web.unican.es/>
- Van Den Brand, T. (2024). *ggplot2 3.5.0*. Tidyverse. <https://www.tidyverse.org/blog/2024/02/ggplot2-3-5-0/>
- Wang, D., Dong, W., Murray, J., & Wang, E. (2022). Innovation and appropriation in mycorrhizal and rhizobial Symbioses. *The Plant Cell*, 34(5), 1573-1599. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac039>

Wirth, A., Pacheco, F., Toma, N., Valiati, V., Tutikian, V., & Gomes, L. (2019). Análisis sobre el crecimiento de hongos en diferentes revestimientos aplicados a sistemas ligeros. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(1).

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732019000100005

Zegers, G., Larrain, J., Díaz, M., & Armesto, J. (2006). Impacto ecológico y social de la explotación de pomponales y turberas de Sphagnum en la Isla Grande de Chiloé. *REVISTA AMBIENTE y DESARROLLO de CIPMA*, 22(1).

<http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1389>"<http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1389>

Zhao, M., Wang, M., Zhao, Y., Hu, N., Qin, L., Ren, Z., Wang, G., & Jiang, M. (2022). Soil microbial abundance was more affected by soil depth than the altitude in peatlands.

Frontiers In Microbiology, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1068540>

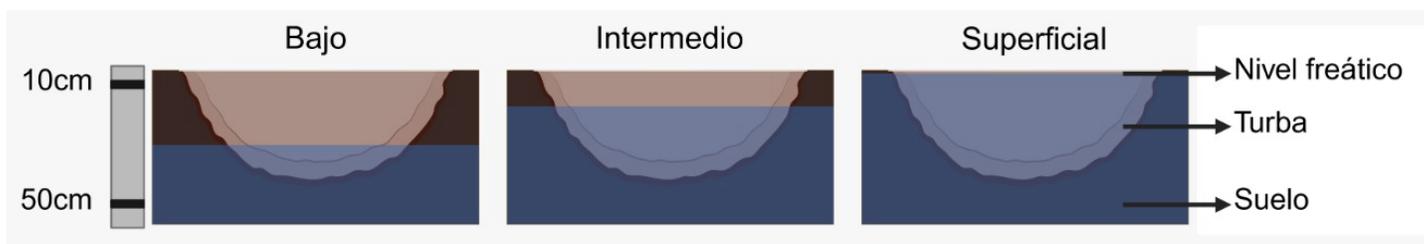
ANEXOS

Anexo 1. Turbera restaurada dividida en los nueve sitios de muestreo



Turbera restaurada de estudio dividida en los 9 sitios a partir de los cuales se realizó la recolección de muestras según la metodología establecida.

Anexo 2. Gráfico de los tres niveles freáticos y las dos profundidades de muestreo en la turbera.



Se presenta la ilustración gráfica de los distintos niveles freáticos considerados en este estudio.

Además, se muestran las dos profundidades a las que se recolectaron las muestras.