



DOCINADE

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo
Énfasis en Gestión de Recursos Naturales

Tesis de Doctorado

Estructura biológica y calidad ambiental de las turberas del Cerro de la Muerte en Costa Rica: conservación y adaptación a la variabilidad climática

Nombre del estudiante

Paola Gastezzi Arias

Dr. Jorge Pérez-Quezada.

Director de tesis

Dra. Gabriela Jones R.

Asesora de tesis

Dr. José. E. Rincón.

Asesor de tesis

Heredia, Costa Rica, 28 de junio del 2024

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Dra. Damaris Castro García
Representante del Consejo Central de Posgrado UNA

Dr. David Valverde Barquero
Coordinador General del DOCINADE

Dr. Jorge Pérez-Quezada
Director de tesis

Dra. Gabriela Jones Román
Miembro del Comité Asesor de Tesis

Dr. José. E. Rincón
Miembro del Comité Asesor de tesis

Paola Gastezzi-Arias
Sustentante

Tabla de contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	6
AGRADECIMIENTOS	9
DEDICATORIA	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 CONTEXTO INVESTIGATIVO	19
2. OBJETIVOS	33
2.1. OBJETIVO GENERAL	33
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
3. SÍNTESIS	34
4. ARTÍCULO 1	36
5. ARTÍCULO 2	58
6. ARTÍCULO 3	84
7. DISCUSIÓN GLOBAL	109
8. CONCLUSIONES	115
9. RECOMENDACIONES	117
10. REFERENCIAS	120

Índice de figuras

Figura 1. Características generales de las turberas de altura del Cerro de la Muerte, Costa Rica.	16
Artículo 1	
Figura 1. Ubicación de las turberas estudiadas a diferentes altitudes.	41
Figura 2. Especies de aves endémicas representativas de tierras altas de Costa Rica y presentes en las turberas de altura del Cerro de la Muerte. A. <i>Thryorchilus browni</i> ; B. <i>Panterpe insignis</i> ; C. <i>Empidonax atriceps</i> ; D. <i>Chlorophonia callophrys</i> .	48
Figura 3. Curvas de acumulación de la riqueza de especies de aves (líneas continuas) y comparación con la riqueza esperada por el estimador no paramétrico Bootstrap (líneas punteadas) en turberas a diferentes altitudes en función del esfuerzo acumulativo de muestreo (meses).	49
Artículo 2	
Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo en las turberas de altura, Cerro de la Muerte, Costa Rica	63
Figura 2. Sustratos artificiales y su colocación en turberas de altura, Costa Rica.	64
Figura 3. Diversidad (A) y dominancia (B) de macroinvertebrados acuáticos presente en los diferentes sitios de muestreo en las turberas de altura, Costa Rica.	69
Figura 4. A) Análisis de correspondencia de asociaciones de las familias de macroinvertebrados con el tipo de sustrato. B) Mapa de calor con las abundancias de macroinvertebrados a nivel de familia en cada tipo de sustrato en las turberas de altura, Costa Rica.	70

Figura 5. A) Análisis nMDS, para el ordenamiento de la riqueza y abundancia de familias de macroinvertebrados acuáticos en ocho sitios de muestreo. B) Mapa de calor con las abundancias de macroinvertebrados a nivel de familia en las turberas de altura, Costa Rica.	71
Figura 6. Análisis de componentes principales de las variables fisicoquímicas del agua y los sitios de muestreo en las turberas de altura, Costa Rica.	73
 Artículo 3	
Figura 1. Ubicación de las turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica. T1-4 (Turbera 1-4).	90
Figura 2. Registro fotográfico de la recolección de muestras compuestas de suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	91
Figura 3. Registro fotográfico de la recolección de muestras de suelo con cilindros en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	92
Figura 4. Dendrograma para los sitios de muestreo y los componentes fisicoquímicos del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	102

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de turberas de acuerdo con las características según su ubicación y formación	24
Artículo 1	
Tabla 1. Listado de las especies de aves identificadas y observadas en las turberas de altura del Cerro de la Muerte, Costa Rica.	44
Tabla 2. Comparación de los índices de diversidad de aves en las turberas de altura en el Cerro de la Muerte 2018 -2019.	49
Tabla 3. Análisis del modelo PERMANOVA de la distancia Bray-Curtis según el rango altitudinal y estación climática.	50
Artículo 2	
Tabla 1. Valores del Índice de Calidad Ecológica del Agua BMWP-CR, según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpo de Aguas Superficiales (Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13).	66
Tabla 2. Composición taxonómica y presencia de macroinvertebrados acuáticos en sustratos artificiales en turberas de altura, Costa Rica.	68
Tabla 3. Promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua en los meses de muestreo, y descripción del puntaje en la aplicación del índice de calidad de agua (ICA-NSF) en las turberas de altura, Costa Rica.	72
Artículo 3	
Tabla 1. Descripción de la vegetación relacionada con el suelo en las turberas de altura Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	94

Tabla 2. Análisis físico del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	97
Tabla 3. Análisis químico de los componentes para del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	99
Tabla 4. Prueba de diferencia de proporciones entre los componentes MO, C y la relación C/N del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.	101

Declaración de autenticidad

Yo Paola Gabriela Gastezzi-Arias, estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, declaro que la Tesis Doctoral que presento para su exposición y defensa titulada “*Estructura biológica y calidad ambiental de las turberas del Cerro de la Muerte en Costa Rica: conservación y adaptación a la variabilidad climática*” y comité asesor de tesis son el Dr. Jorge F. Pérez Quezada, el Dr. José E. Rincón, y la Dra. Gabriela Jones Román, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo. Este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Heredia, Costa Rica, 28 de junio del 2024.

Paola Gastezzi-Arias
Firma Nombre del Estudiante

Agradecimientos

A Dios por darme las fuerzas y la sabiduría durante todo este proceso de aprendizaje, por permitirme alcanzar un sueño y por ser mi compañía en todo momento.

Al Dr. Jorge Pérez-Quezada, por sus contribuciones, enseñanzas y la oportunidad brindada a lo largo de mi estancia en su Laboratorio en la Universidad de Chile y durante todo este proyecto, muchas gracias por confiar en mí.

A la Dra. Gabriela Jones, por confiar en mí y darme sus valiosas enseñanzas y apoyo constante durante todo el doctorado.

Al Dr. José Rincón por sus aportes y consejos brindados durante este trabajo de investigación, sus conocimientos me ayudaron a dirigir el trabajo de investigación.

Al Consejo Institucional de Becas de la Universidad Estatal a Distancia por la beca otorgada ORH-71- 2021, que me permitió realizar el Doctorado y mi pasantía de investigación en la Universidad de Chile.

Al Laboratorio de Vida Silvestre y Salud de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia, permitirme desarrollar mi trabajo de campo de esta investigación, por brindarme todos los equipos y apoyo necesarios para el desarrollo de mi tesis, así mismo al Programa de Laboratorio de la Universidad Estatal a Distancia (PROLab), que me permitió utilizar el equipo para el desarrollo de mi tesis.

Al Parque Nacional Los Quetzales, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, en especial a Fabricio Carbonell del Sistema Nacional de Áreas de Conservación y al Sr. Rodolfo Jiménez de la Reserva Biológica Cerro Vuelta.

A mis colegas, compañeros y amigos en especial a Virginia Alvarado García, Johnny Villareal Orias, Daniel Martínez Araya, Yarenis Chavarría Valverde, por el apoyo todos estos años de en el trabajo de campo y la tesis.

Dedicatoria

A mi incondicional familia que me acompañó durante todo este proceso, en especial a mi madre Carmen Arias, a la familia Martínez Araya en particular a mis suegros Doña Ana Cecilia Araya y Don Oscar Martínez por toda su ayuda, a mi esposo Daniel Martínez Araya y a mi hijo Emiliano Martínez, porque siempre me dieron todo el apoyo para continuar con mis estudios de Doctorado y llegar hasta el final. Dedico también este trabajo a la memoria de mi padre Armando Gastezzi que desde pequeña me impulsó a amar a la naturaleza, en especial a los humedales y siempre me motivó a seguir adelante con esfuerzo. A la memoria de mi hermano, a mis hermanas y a todos mis sobrinos.

Resumen

Las turberas son un tipo de humedal que tiene una capa de turba almacenada de forma natural en su superficie. La turba es la acumulación de la materia orgánica (MO) formada por la descomposición producida por plantas como el musgo *Sphagnum* spp y otras plantas adaptadas a vivir en condiciones de saturación permanente de agua, con reducido oxígeno y poca disponibilidad de nutrientes. Son reconocidas por jugar un papel vital en mantener el carbono orgánico en el suelo, en la regulación del agua y favorecer la conservación de la biodiversidad. Esta investigación tuvo como objetivo analizar la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas del Cerro de la Muerte mediante el uso de indicadores biológicos y fisicoquímicos, para el fortalecimiento de su conservación y adaptación a la variabilidad climática. Se evaluaron ocho turberas ubicadas en el parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte y la Reserva Biológica Cerro Vueltas, a diferentes altitudes que van desde los 2400 a 3100 m.s.n.m. En cada una de las turberas se utilizaron bioindicadores como las aves para el monitoreo del ecosistema y los macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos (oxígeno, pH, conductividad, temperatura, entre otros parámetros), para conocer la calidad del agua. Además, se estudió el suelo para conocer sus características y composición. Esta investigación generó tres manuscritos como producto de los objetivos específicos planteados. El primer artículo denominado: Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en las turberas de altura en Costa Rica. En el que se logró identificar 75 especies (25 familias, 11 órdenes), se encontró la mayor diversidad ($H'=3,12$) y riqueza de aves (49 especies observadas y 56 esperadas) en turberas a 2400 metros de altitud, y la menor a 2600 y 2800 m.s.n.m. Un 43 % de las especies son endémicas, el 34 % residentes y el 14 % migrantes latitudinales. Se demostró que las turberas podrían presentar cambios estructurales debido a las variaciones en los patrones de lluvias. El segundo artículo denominado: Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura, Costa Rica, evaluó la variación en la composición de macroinvertebrados acuáticos según parámetros fisicoquímicos del agua. La relación de los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua se debe a que son sensibles a los cambios en las condiciones del entorno acuático, su presencia y abundancia están estrechamente ligadas a la calidad del agua y la salud del ecosistema acuático. Se registraron 10 familias y siete géneros. Las familias más representativas fueron Chironomidae y Limnephilidae. La calidad del agua se clasificó según el ICA-NSF como "calidad media" y como "calidad regular a mala" según el BMWP-CR, y el tercer manuscrito denominado: Las turberas de altura del Parque Nacional

Tapantí en Costa Rica: caracterización e importancia del suelo turboso, caracterizó el suelo con el fin de conocer el contenido de MO y de carbono en el suelo turboso. Se demostró que los suelos en las turberas poseen un 32.9 % de carbono y el de MO fue 7.1 % en la Turbera 3 con respecto a las otras turberas, mientras que la relación C/N fue mayor en la Turbera 1 con una relación de 22.3 %. Los resultados destacan la importancia de las turberas para mantener la biodiversidad endémica y cumplir con su rol ecosistémico de las tierras altas, que contribuye a mitigar los efectos de la variabilidad climática, debido a su capacidad de almacenar agua y carbono en el suelo. Por lo tanto, es fundamental estudiar y monitorear las turberas a largo plazo, especialmente debido al papel crucial que desempeñan en la provisión de servicios ecosistémicos importantes. Las turberas de altura son ecosistemas frágiles que mantienen la biodiversidad y procesos ecológicos esenciales para las tierras altas de Costa Rica. No obstante, la variabilidad climática puede afectar las características fisicoquímicas del agua y el suelo, el procesamiento de la MO, el contenido de carbono y nutrientes en el suelo, la formación de la turba y la biodiversidad de las turberas. La información producida en este estudio aporta un valioso insumo de datos biológicos y ecológicos, que permite comprender su función y su rol frente a la variabilidad climática. Además, esta información sirve para demostrar la pertinencia de reforzar la inclusión de las turberas de altura en estrategias locales de adaptación climática, dado que constituyen un enfoque novedoso debido a la función que desempeñan como reservorios de agua y carbono, y sitios de alto endemismo de especies claves en las turberas de altura.

Palabras claves

Humedales de altura; bioindicador; materia orgánica; suelo turboso; calidad del agua

Abstract

Peatbogs are a type of wetland that has a naturally stored peat layer on its surface. Peat is the accumulation of organic matter (OM) formed by the decomposition produced by plants such as *Sphagnum* spp moss. and other plants adapted to living in conditions of permanent water saturation, reduced oxygen, and low nutrient availability. They are recognized for playing a vital role in maintaining organic carbon in the soil, regulating water, and supporting biodiversity conservation. The objective of this research was to analyze the biological structure and environmental quality of Cerro de la Muerte peatbogs using biological and physicochemical indicators to strengthen their conservation and adaptation to climate variability. Eight peatbogs located in the Tapantí Macizo de la Muerte National Park and the Cerro Vueltas Biological Reserve, at different altitudes ranging from 2400 to 3100 m, were evaluated. In each of the peatbogs, bioindicators such as birds were used to monitor the ecosystem and aquatic macroinvertebrates and physicochemical parameters (oxygen, pH, conductivity, temperature, and other parameters), were used to determine water quality. In addition, the soil was studied for its characteristics and composition. This research generated three manuscripts as a product of the specific objectives. The first article entitled: Altitudinal distribution of bird richness and diversity in high altitude peatlands in Costa Rica. In which 75 species (25 families, 11 orders) were identified, the highest diversity ($H'=3.12$) and richness of birds (49 species observed and 56 expected) was found in peatlands at 2400 m, and the lowest at 2600 and 2800 m. Forty-three percent of the species were endemic, 34 % resident and 14 % latitudinal migrants. It was shown that peatlands could present structural changes due to variations in rainfall patterns. The second article entitled: Composition of macroinvertebrates according to water quality in high altitude peatlands, Costa Rica, evaluated the variation in the composition of aquatic macroinvertebrates according to physicochemical parameters of the water. The relationship of macroinvertebrates as indicators of water quality is because they are sensitive to changes in the conditions of the aquatic environment, and their presence and abundance are strongly associated with water quality and the health of the aquatic ecosystem. Ten families and seven genera were recorded. The most representative families were Chironomidae and Limnephilidae. Water quality was classified according to the ICA-NSF as "medium quality" and as "regular to poor quality" according to the BMWP-CR, and the third article entitled: The high altitude peatbogs of Tapantí National Park in Costa Rica: characterization and importance of peaty soil, in this manuscript the soil was characterized in order to know the MO and carbon content in the peaty soil. It was demonstrated

that soils in the peatlands have 32.9 % carbon, and the MO was 7.1 % in Peatland 3 with respect to the other peatlands, while the C/N ratio was higher in Peatland 1 with a ratio of 22.3 %. The results highlight the importance of peatlands in maintaining endemic biodiversity and fulfilling their upland ecosystem role, which contributes to mitigating the effects of climate variability, due to their ability to store water and carbon in the soil. Therefore, it is essential to study and monitor peatbogs over the long term, especially because of the crucial role they play in providing important ecosystem services. High altitude peatbogs are fragile ecosystems that maintain biodiversity and ecological processes essential to the highlands of Costa Rica. However, climate variability can affect the physicochemical characteristics of water and soil, OM processing, soil carbon and nutrient content, peat formation, and peatbogs biodiversity. The information produced in this study provides a valuable input of biological and ecological data, which allows us to understand their function and role in the face of climate variability. Furthermore, this information serves to demonstrate the relevance of strengthening the inclusion of high altitude peatbogs in local climate adaptation strategies, as they constitute a novel approach due to their role as water and carbon reservoirs, and sites of high endemism of key species in high altitude peatbogs.

Keywords

High altitude wetlands; bioindicator; organic matter; peaty soil; water quality

1. Introducción

El término humedal es amplio y tiene varias definiciones; la más utilizada es la que propone la Convención Ramsar, la cual lo define como: "*extensiones de marisma, pantanos, turberas, cuerpos de agua de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas, corrientes, dulces, salobres y saladas incluyendo las áreas de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros*" (Ramsar, 2002). En términos generales, los humedales son zonas donde el agua y la tierra interactúan, lo cual da lugar a la formación de hábitats idóneos para el desarrollo de la biodiversidad. Estos ecosistemas también proveen una amplia gama de bienes y servicios esenciales para la supervivencia y el desarrollo de las sociedades (Benavides, 2013; Domínguez y Bahamonde, 2012).

Por muchos años, los humedales fueron considerados como tierras de poco valor y sin importancia para su conservación, lo cual los llevó a su alteración, disecación y eliminación (Bravo, 2015). A pesar de su importancia, los humedales se encuentran amenazados por las actividades antrópicas, que implica el cambio del uso del suelo, la deforestación, el drenaje de sus aguas como consecuencia del crecimiento de la frontera agrícola y la expansión urbana (Acuña-Piedra y Elizondo-Campos, 2018). En las últimas décadas, el estudio de los humedales ha aumentado debido a los valiosos servicios ecosistémicos que brindan, por la gran biodiversidad que albergan, por su importancia hídrica y, además, porque ayudan a mitigar los efectos del cambio climático (Rodríguez-Arias y Silva-Benavides, 2017).

La región tropical posee una mayor superficie de humedales concentrados en tierras bajas como costas, estuarios, manglares, ríos, entre otros. Sin embargo, también existen humedales de alta montaña conocidos como turberas de altura, las cuales poseen condiciones climáticas especiales debido a su ubicación y son de gran relevancia sobre todo por la regulación y captación hídrica, y el endemismo que mantienen (Barthelmes y Joosten, 2018; Veas-Ayala et al., 2018).

La estructura biológica de una turbera de altura es única, está compuesta principalmente por una capa superficial de vegetación de hábitos acuático o semi acuáticos que crecen sobre un lecho de turba, como por ejemplo musgos, líquenes, entre otras (Domínguez y Vega, 2015; Blanco y Balze, 2004). Figura 1.



Figura 1. Características generales de las turberas de altura del Cerro de la Muerte, Costa Rica. Fotos: P. Gastezzi-Arias

La capa superior de una turbera está dominada por musgos, como el *Sphagnum* spp, que tienen la capacidad de retener grandes cantidades de agua. Debajo de esta capa, se encuentra la turba, que es una acumulación de materia orgánica en descomposición, principalmente de restos de plantas. El material turboso es rico en carbono y contribuye al almacenamiento de éste en el suelo (Suárez et al., 2022; FAO, 2015; Benavides, 2013). Las turberas se destacan por su capacidad de retener y acumular grandes cantidades de agua, lo que marca su importancia en las regiones donde se encuentran (Iturraspe, 2010). Almacenan hasta un 10% del agua dulce y acumulan hasta 35 veces su peso en agua, lo que evita las sequías y contribuye al aumento de la escorrentía que alimenta las cuencas hidrográficas; además, albergan una variedad de especies vegetales y animales adaptadas a condiciones específicas y su estructura biológica contribuye a la retención de agua y la conservación del carbono (Monsalve et al. 2021; León et al., 2021; FAO, 2015; Benavides, 2013; Kaeslin et al, 2013; Brak et al, 2005; Blanco y Balze, 2004; Ramsar, 2002).

Las turberas son ecosistemas únicos, que cubren del 3 al 4% de la superficie terrestre del planeta y almacenan hasta un tercio del carbono en el suelo (Blanco y Balze, 2004), por lo que son reconocidas por jugar un papel vital en evitar y reducir las emisiones de los gases de efecto

de invernadero (Castilla et al., 2021; Mejía et al., 2022; UNEP, 2022). Por ello, el estudio de las turberas ha tomado relevancia mundial en los últimos años.

Estudios relacionados con la variabilidad climática y las turberas, han revelado valiosa información sobre la dinámica del carbono, respuesta de la vegetación y microbiota a las variaciones climáticas, así como las implicaciones para la conservación y gestión de los recursos hídricos (Meza-Aliaga y Díaz-Villalobos, 2014). El conocimiento sobre la variabilidad climática en turberas desempeña un papel crucial en la comprensión de los efectos del cambio climático en los ecosistemas terrestres y en la toma de decisiones informadas para su preservación (Wright et al, 2013; Domínguez y Bahamonde, 2012; Otero et al., 2001; Yavitt et al., 1988).

En Latinoamérica, las turberas de altura han sido ampliamente estudiadas en países como Chile, Argentina, Colombia, Ecuador y Perú. Sin embargo, en Costa Rica, las turberas de altura han recibido poca atención debido a la dificultad de acceso y el escaso conocimiento sobre estos ecosistemas (Kapelle y Horn 2005; Chaverri y Cleef, 1996). Los pocos estudios realizados han revelado la fragilidad y vulnerabilidad de las turberas de altura en respuesta a perturbaciones humanas y cambios ambientales (León y Reyes, 2018; Veas-Ayala et al., 2018).

Es importante mencionar que en las tierras altas de Costa Rica existen formaciones como los páramos y turberas. Los páramos se caracterizan por presentar suelos mayormente de origen volcánico, paisajes bioclimáticos desarbolados, fríos y en Costa Rica se localizan entre los 3.200 y 3.800 m de altitud (Otero et al., 2001; Castañeda-Martín y Montes-Pulido, 2017), mientras que las turberas de altura presentan suelos compuestos mayormente de materia orgánica y saturados de agua permanente o semipermanente, dominados por cojines de musgo *Sphagnum* spp., y otras briófitas, así como juncos, líquenes y arbustos en su mayoría de la familia Ericaceae. Las turberas de altura en Costa Rica se ubican desde los 2400 a 3100 metros de altitud (Díaz et al., 2015; Kapelle y Horn 2005).

Las primeras investigaciones sobre turberas de altura de Costa Rica fueron descritas por Weston (1981), quien las identificó como ciénagas y reportó sus suelos como ácidos y mal drenados. Por otra parte, Gómez (1986), comparó las turberas de altura con los páramos, debido a su similitud florística, fisonómica y ecológica, con las turberas de las sabanas de bajura. Además, reportó que las aguas de las turberas son ácidas y que se originan sobre depresiones entre cerrillos y colinas. Hooghiemstra et al., (1992), estudiaron la dinámica de la vegetación cuaternaria y paleoclimatología de la zona de turberas de La Chonta en la carretera Interamericana Sur. Chaverri y Cleef (1996), describieron las comunidades vegetacionales en los

páramos de los macizos del Chirripó y Buenavista en la Cordillera de Talamanca, donde realizan una clasificación de la vegetación según el sustrato en comunidades hídrica y xéricas. Asimismo, Brak et al. (2005), describieron las comunidades vegetales de la turbera denominada La Chonta; Castro (2005), realizó una pequeña descripción general de la turbera La Chonta y su relación con la sociedad local; y finalmente León y Reyes (2018) describieron biofísicamente dos turberas y una laguna endorreica en el Parque Nacional Tapantí.

A pesar de las investigaciones que se han descrito anteriormente, el conocimiento sobre las características biológicas y la conservación de estos ecosistemas sigue siendo limitado, y principalmente, los posibles efectos de la variabilidad climática sobre las turberas de altura. Los humedales y en específico las turberas, se encuentran entre los ecosistemas más amenazados del mundo debido a procesos de degradación e intervención humana, lo que las hace altamente vulnerables a desaparecer (Suárez et al., 2022; León et al., 2021; Domínguez y Vega, 2015; Martínez et al., 2009; Díaz et al, 2005).

De acuerdo con lo anterior, los estudios previos sobre las turberas en Costa Rica han sido un pilar fundamental para ampliar la comprensión de estos ecosistemas y resaltar la necesidad de su preservación. No obstante, los retos primordiales que enfrentan las turberas, debido a su fragilidad y vulnerabilidad inherentes, radican en la alteración del ecosistema y las perturbaciones de origen humano, como han señalado León y Reyes (2018).

Siguiendo esta línea, el estudio de la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas es esencial porque contribuye a conservar la biodiversidad que existe en ellas; a identificar especies indicadoras de la calidad ambiental; a mantener la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y abastecer a las comunidades humanas locales; a evaluar el almacenamiento de carbono en suelo y su afectación por el cambio climático; a generar conciencia sobre su protección para garantizar su conservación; y a tomar decisiones informadas sobre su conservación y manejo (Domínguez y Vega, 2015; Martínez et al., 2009).

En relación con esto, la pregunta central planteada en esta investigación se basa en si la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas de altura cumplen su rol ecosistémico ante la variabilidad ambiental. Con lo que se aporta información ecológica valiosa para incrementar el monitoreo, la gestión sostenible de estos ecosistemas, y reforzar su conservación frente a los desafíos y amenazas que enfrentan las turberas hoy en día. Por lo tanto, este estudio pretende analizar la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas del Cerro de la

Muerte en Costa Rica para su conservación y adaptación a la variabilidad climática, mediante la utilización de diferentes indicadores biológicos y fisicoquímicos.

Para ello, el enfoque metodológico con que se realizó esta investigación implica una serie de técnicas y métodos científicos, que varían de acuerdo con los objetivos planteados y los recursos disponibles. Los métodos incluyeron indicadores biológicos como la riqueza y diversidad de la avifauna local, y los macroinvertebrados acuáticos; además de parámetros físicos y químicos para valorar la calidad del agua de las turberas; y finalmente se caracterizó y describió el suelo turboso para conocer su dinámica y composición. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan significativamente a la ampliación del conocimiento, resaltando la trascendencia de las medidas de conservación necesarias para proteger las limitadas extensiones de turberas de altura en Costa Rica. Asimismo, se espera que este trabajo genere conciencia en la sociedad acerca de la importancia de estos ecosistemas.

1.1 Contexto investigativo

De esta investigación, es importante comprender la importancia de las turberas no solo para conocer la dinámica de estos ecosistemas en sí, sino también para abordar los desafíos que enfrentan, dado que son ecosistemas vulnerables a la variabilidad climática y a la intervención humana. El conocimiento sobre las turberas puede ser crucial para la toma de decisiones para aumentar su conservación. A continuación, se describen términos conceptuales y teóricos en el contexto de esta investigación.

1.1.1. Las turberas: definición

Las turberas son ecosistemas donde la descomposición de la materia orgánica es lenta debido a una serie de condiciones particulares. Entre estas condiciones se incluyen el anegamiento constante, la acidez del agua y suelo, la falta de oxígeno (anoxia), la baja disponibilidad de nutrientes, las bajas temperaturas del agua, nivel freático cercano a la superficie y patrones de lluvia constantes (Suarez et al., 2022; León et al., 2021; Finlayson y Milton 2018). Estas condiciones inhiben la actividad de microorganismos descomponedores como hongos y bacterias, lo que permite la acumulación y formación de depósitos ricos en materia orgánica parcialmente descompuesta, conocidos como turba. Estas características únicas hacen que las turberas alberguen una flora y fauna adaptada a estos ambientes específicos (Suarez et al., 2022; Díaz et al., 2015; Ponce et al., 2014).

Es importante destacar que el término "turba" se refiere a la materia orgánica muerta en proceso de descomposición, mientras que una "turbera" es un área que produce y acumula gradualmente turba, incrementando así el espesor del depósito orgánico. Según la definición, el espesor de una turbera puede variar de 30 a 50 cm (Ponce et al., 2014). La formación del material turboso está intrínsecamente ligada al material mineral de tipo aluvio-coluvial (León et al., 2021; Blanco y Balze, 2004; Otero et al., 2001).

1.1.2. Características e importancia de las turberas

Las turberas, son ecosistemas característicos, se originan por el flujo natural del agua procedente de zonas montañosas o a través de la precipitación pluvial (Domínguez y Bahamonde, 2012). Estas formaciones se desarrollan principalmente en áreas con deficiente drenaje del terreno, a menudo en regiones relativamente planas o cerca de pequeñas lagunas. La génesis de las turberas no se atribuye únicamente a factores climáticos, sino que también depende de las condiciones edáficas del suelo y la geomorfología del área, lo que define su presencia (Ramsar, 2002; Iturraspe, 2010).

La importancia de las turberas en el ciclo hidrológico se debe al almacenamiento de agua de la calidad del agua, la recarga de acuíferos y el control de las inundaciones y sequías (Díaz et al., 2015; Iturraspe, 2015; Ponce et al., 2014; Yu et al., 2010). Además, desempeñan un papel clave en conservación de la biodiversidad y archivos paleoambientales (Iturraspe, 2010). Por otra parte, la producción de la biomasa vegetal y el humus que se acumula en las turberas contiene carbono como parte de su estructura molecular; consecuentemente, los depósitos de turba representan reservorios importantes de carbono (Wright et al., 2013). Por esta razón, las turberas son un componente estructural del ciclo global del carbono, participando activamente en la regulación del clima del planeta (Yu et al., 2010).

Las turberas suelen estar representadas por comunidades vegetales particulares que se distinguen en su composición y estructura, por lo que estas albergan una rica flora de musgos y hepáticas, y en muchas turberas estos son dominantes (León et al 2021; Larraín, 2015). Las plantas que se desarrollan en las turberas necesitan adaptaciones especiales para sobrevivir en un suelo saturado con agua o sumergido (Moor et al., 2017).

Los musgos del género *Sphagnum* spp, es probablemente el grupo más importante de plantas formadoras de turba (Larraín, 2015). Las turberas de *Sphagnum* spp ocupan extensas superficies de tierra, y estos tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua en

relación con su peso seco, por lo que muchos especialistas consideran al musgo *Sphagnum* spp como el organismo terrestre que más contribuye a la captación de carbono atmosférico disminuyendo así los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (Larraín, 2015). Por otra parte, la turba y el musgo *Sphagnum* spp se reconocen mundialmente como un valioso recurso económico, con los productos derivados de las turberas se utilizan como combustible, para absorber vertidos de petróleo y como sustrato para hortalizas (León et al 2021).

1.1.3. Estructura de las turberas

En una turbera se pueden distinguir dos capas en el horizonte principal del perfil estratigráfico, las cuales poseen propiedades muy distintas, estas capas son: el acrotelmo y el catotelmo (Díaz et al., 2015; Iturraspe, 2010). Para el caso del acrotelmo, esta es una capa superficial biológicamente activa de una turbera, en el que el nivel freático fluctúa a lo largo del tiempo y es donde ocurre el 90% de la descomposición de la materia orgánica que eventualmente constituirá la turba. Esta capa va desde la superficie hasta una profundidad determinada por el nivel freático (usualmente entre 30 y 50cm de profundidad). En esta capa dominan plantas hidrófilas con una gran capacidad para retener agua, en especial musgos del género *Sphagnum* spp. Esta es una zona aeróbica, con alta conductividad hidráulica, en donde tienen lugar procesos como la fijación de carbono y la descomposición de la materia orgánica (Domínguez y Martínez, 2021; Díaz et al., 2015; Iturraspe, 2010).

Por otra parte, el catotelmo, se ubica por debajo del acrotelmo, desde el nivel freático y hasta el suelo mineral (Díaz et al., 2015). Se encuentra en un estado de anegamiento constante, por lo que aquí la materia orgánica la descomponen microorganismos que logran hacer este proceso sin presencia de oxígeno y, por lo mismo, es muy lento en comparación con las tasas de descomposición en el acrotelmo. Según sean las propiedades fisicoquímicas y biológicas de cada uno de estos estratos, los procesos asociados a la dinámica del carbono que ocurren en cada una de estas capas son substancialmente distintos (Díaz et al, 2015; Yu et al. 2013; Iturraspe, 2010). A largo plazo, el catotelmo genera la capa de turba característica de estos ecosistemas, y que puede alcanzar varios metros de profundidad. Desde el acrotelmo al catotelmo, las estructuras vegetales se van descomponiendo de manera incompleta a una tasa menor a 1 mm/año (Iturraspe, 2010). Desde una perspectiva global, dependiendo de cómo se comporte la mayor parte de las turberas del planeta durante periodos prolongados de tiempo (i.e. fuente emisora o sumideros de carbono), estos ecosistemas contribuyen al aumento o

disminución de la temperatura de la Tierra (Domínguez y Martínez, 2021; Yu et al. 2013; Iturraspe, 2010).

1.1.4. El suelo turboso

Los suelos turbosos son únicos y están compuestos por sustancias orgánicas, a partir de la descomposición de restos vegetales que se han acumulado sobre terrenos anegados y mal drenados. Son considerados uno de los hábitats con mayor riqueza de especies, debido a que alberga más de una cuarta parte de toda la biodiversidad mundial (Lazarova, et al., 2011), y posee una enorme abundancia de microorganismos, los cuales son fundamentales para los ecosistemas (Laban, et al., 2018; Flores y Alcalá, 2010). Los suelos de las turberas son de tipo bog y fen. Los de tipo *bog* aplica cuando el aporte del agua es únicamente atmosférico (lluvias). Estos se originan a partir de la descomposición del musgo *Sphagnum* spp que pueden estar parcial o totalmente descompuesto. Así mismo, los valores de pH en este tipo de suelos son fuertemente ácidos, cuyos valores fluctúan entre 3,2 y 4,0. Por otra parte, la vegetación en suelo puede estar mayormente dominado por el musgo *Sphagnum* spp, que lo cubre y aporta protección, nutrientes y materia orgánica (Monsalve et al, 2021). Los de tipo *fen*, son aquellas en las que la alimentación hídrica procede principalmente de aguas de escorrentía o de acuíferos profundos. Se diferencian dos tipos: Topógenas: Cuando el aporte principal de agua se debe a acuíferos profundos, y Solígenas: Cuando el aporte principal es el agua de escorrentía (Monsalve et al, 2021; Iturraspe, 2010).

Por otra parte, el suelo turboso es un recurso valioso que desempeña un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua y almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS), formando así, ecosistemas con alto contenido de materia orgánica que desempeñan funciones ambientales importantes (León y Reyes, 2018; Inisheva, 2006). En las turberas, el COS es la reserva de carbón importante que puede representar entre el 20 y 30% del carbono global del suelo, estos suelos son oscuros y del tipo Histosoles, con al menos los 40 cm superiores del suelo son de naturaleza orgánica, de lenta mineralización y descomposición bioquímica donde se forman sustancias húmicas manteniendo la capa superficial orgánica con saturación hídrica permanente (Ramil-Rego y Rodríguez-Gutián, 2017). La composición del COS proporciona información sobre varios procesos claves, como la producción de biomasa, la degradación de la necromasa (detritos de origen vegetal que reposan en la superficie del suelo que pueden estar en estado fresco o en bajo grado de descomposición), el almacenamiento de carbono orgánico y sobre el ciclo del carbono en los humedales (Quinteros-Gómez et al., 2021; Grasset et al, 2017).

El interés de estudiar y medir el COS se fundamenta en que este es un indicador de calidad de suelo, y su variación puede tener implicaciones en procesos ambientales como fertilidad de suelo, erosión y flujos de gases efecto invernadero (Castañeda-Martín y Montes-Pulido, 2017).

1.1.5. Hidrología de las turberas

Se considera que una turbera es el 90 % agua, por lo que esta característica juega un rol importante en el abastecimiento de este elemento en lugares con temporada seca, muy marcada, debido a que mantienen una disponibilidad de agua constante (Iturraspe, 2010; Díaz et al., 2008). Las turberas representan cerca del 50 % de todos los humedales del mundo y se encuentran en los cinco continentes. En la alta montaña, existe un grupo de turberas llamadas bofedales situados en los Andes centrales, donde existen plantas especialistas de formar turba como las Juncaceae, y se abastecen de agua subterránea asociada al derretimiento de nieve. (Grasset et al, 2017; Iturraspe, 2010; Díaz et al., 2008).

El origen del agua que alimenta a una turbera influye sobre la cantidad de nutrientes inorgánicos disponibles para las plantas, y esto determina el tipo de comunidades vegetales que se pueden desarrollar en una turbera (Suárez et al, 2022). La condición es clave para que la materia orgánica almacenada se preserve durante tanto tiempo, así como la disponibilidad de agua en forma permanente, ya sea por la frecuencia de lluvias local o por contribuciones procedentes de áreas adyacentes, o con deficientes condiciones de drenaje (Iturraspe, 2015). Las turberas que dependen de nuevos aportes de agua de lluvia se las denomina como ombrotáficas. En otros casos, la turbera se forma y se alimenta con aportes de agua subterránea que recorre el suelo o la roca madre y va arrastrando minerales que modifican la química y el contenido de nutrientes del agua y de la turbera se denominan minerotáficas (Suarez et al, 2022).

La estructura física de una turba es diferente a la de los suelos minerales, y define propiedades hidrológicas especiales. En el ambiente de las turberas hay presencia de hierro, capturado de las aguas superficiales y subterráneas en las que este ión presenta alta concentración, siendo éste un ejemplo local de la función reguladora de la química del agua por parte de los humedales (Iturraspe, 2010).

Por otra parte, como se mencionó anteriormente las turberas presentan niveles de saturación hídrica permanente, sin embargo, el entorno paisajístico puede diferir entre ellas por el nivel hídrico, evapotranspiración y composición florística. Es así como, el tipo de vegetación

produce distintos tipos de turba que no se distingue en suelos oscuros, con presencia de humus, y se encuentra muy descompuesta (Quinteros-Gómez et al., 2021).

1.1.6. Sistema de clasificación de turberas según sus características

Las turberas han sido clasificadas de acuerdo con fines específicos, y se subdividen en categorías muy diversas en función de su actividad como, por ejemplo, por la cobertura vegetal, profundidad del agua, localización, tipo y formación del suelo sobre los que se asientan, mantener una biodiversidad única, protección de fuentes hídricas, entre otras características. Además, es importante destacar que el relieve de las turberas y sus alrededores son importante para su clasificación (León, et al., 2021; Barthelmes y Joosten, 2018).

En función de su actividad, el término “turbera” se denomina al tipo de turbera activa y designa a una turbera en la que la turba se encuentra aún en proceso de formación y acumulación (Barthelmes y Joosten, 2018; Martínez et al., 2009). Diversos estudios sobre la clasificación de turberas (Ramsar, 2002a, Martínez et al., 2009; Blanco & Balze, 2004; UNEP, 2022), hacen una diferenciación importante entre las turberas altas (turberas arbustivas - bog) que se elevan por encima del paisaje circundante y el agua que las alimenta proviene de las precipitaciones, así mismo, las turberas bajas (gramíneas o carrizo - fens), que se encuentran en depresiones son alimentadas con agua que ha estado en contacto con el lecho rocoso mineral y el suelo. A continuación, en la Tabla 1, se presenta una clasificación según su ubicación y formación.

Tabla 1. Clasificación de turberas de acuerdo con las características según su ubicación y formación

Clasificación	Características
Posición Paleogeográfica	
<ul style="list-style-type: none"> • Parállica 	Se refiere a las turberas costeras o cercanas al litoral, tiene conexión hidrológica con el agua marina (aunque la acumulación de turba sea en agua dulce).
<ul style="list-style-type: none"> • Limnica 	Son las desconectadas del agua marina. Se sitúan hacia el interior del continente y están relacionadas con los lagos o zonas encharcadas de agua dulce.
<ul style="list-style-type: none"> • Telmática 	Están en ocasiones ligado a turberas de medio fluviales, situadas en áreas continentales no lacustres.

Estadio evolutivo	
• Turbera alta	Es un tipo de turbera elevada, cuya acumulación de restos vegetales se da lugar por encima del nivel freático regional. El aporte de agua proviene únicamente de la precipitación (turbera ombrotrofica).
• Turbera baja	Turberas que se forman en depresiones, en la que se acumula restos vegetales por debajo del nivel freático. El aporte de agua se produce por flujo lateral (turbera reotrofica).
• Turbera flotante	Turberas formadas por una maraña vegetal flotante unida a la orilla o enraizada en el fondo (puede llegar a soportar árboles).
Cantidad de nutrientes/ minerales	
• Eutrónica	Turbera con una gran cantidad de nutrientes. Corresponde generalmente a las turberas reotroficas y bajas.
• Mesotrofica	Turbera que dispone de una cantidad moderada de nutrientes.
• Oligotrofica	Turbera con casi ningún nutriente o son muy escasos. Se corresponde generalmente con las turberas ombrotroficas y altas.
Aporte de agua	
• Ombrotrofica	Alimentada únicamente del agua procedente de las precipitaciones.
• Rheotrofica	Alimentada por un flujo lateral de agua y por precipitación.
Tipo de vegetación	
• Arbóreas (<i>Forest peat</i>)	En estas turberas predominan árboles. Si embargo, algunos autores refieren el termino equivalente a pantano, aunque este término es usado para las turberas con bajo el influjo del agua dulce.
• Herbáceas	Predominan los arbustos, cañas, juncos, etc. En algunos casos es equivalente al término marisma, aunque éste es aplicado a las turberas herbáceas costera bajo el influjo del agua salada o salobre.

Tomado de Martínez et al., 2009; Blanco & Balze, 2004.

Por otra parte, también existen otras clasificaciones desde el punto de vista florístico, fisionómico y ecológico, por lo que se las clasifican como: turberas esfagnosas, turberas pulvinadas, turberas de tundra y turberas cipero-graminoides, las que varían dependiendo de

factores ambientales como la profundidad del acuífero, el grado de descomposición de la turba, el gradiente de acidez-alcalinidad, el relieve y la continentalidad, entre otras características (Monsalve et al., 2021).

Así mismo, Ramsar (2002b), presenta un sistema de clasificación de los humedales, y en su Resolución VIII, 11 (COP8, 2002), menciona que las turberas se definen por la presencia de un sustrato turboso, mientras que el Sistema de Clasificación de Ramsar se basa por la vegetación presente. Es por esta razón, que las turberas no se integran en una única unidad del Sistema de Clasificación de Tipos de Humedales de la Convención de Ramsar, si no que presentan de distintas categorías ((Ramil-Rego & Rodríguez-Gutián, 2017).

De acuerdo con Ramsar (2002b) en la Resolución VIII, 11 (COP8, 2002), presenta una orientación para identificar y designar turberas, pastizales húmedos, manglares y arrecifes de coral como Humedales de Importancia Internacional, la cual menciona lo siguiente:

Las turberas son ecosistemas con un depósito de turba que puede mantener actualmente una vegetación que forma turba, puede no mantenerla o puede carecer enteramente de vegetación. La turba está formada por restos vegetales descompuestos que se han acumulado in situ en condiciones de saturación de agua. Un “mire” es un humedal con una vegetación que generalmente está formando turba. La presencia de turba o de una vegetación capaz de formar turba es una característica esencial de las turberas y los “mires”. Puesto que las turberas y los “mires” se definen por la presencia de un sustrato de turba, mientras que el Sistema de Clasificación de Ramsar se basa en la vegetación, las turberas y los “mires” aparecen en distintas categorías del Sistema de Clasificación de Tipos de Humedales de la Convención de Ramsar.

- *Pueden aparecer como humedal marítimo/costero dentro de las categorías I (humedales intermareales arbolados) y E (playas de arena o de guijarros, incluidos los sistemas de dunas) y quizás en zonas marginales de K (lagunas costeras de agua dulce).*
- *Pueden aparecer como humedal continental, principalmente en U (turberas no arboladas) y Xp (turberas arboladas).*
- *Los suelos de turba pueden también estar presentes en otras categorías de humedales continentales excepto en M (ríos/arroyos permanentes), Tp (pantanos/ esteros/ charcas permanentes de agua dulce, sobre suelos inorgánicos), Ts (pantanos/ esteros/ charcas/ intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos), W (pantanos con vegetación arbustiva, sobre suelos inorgánicos), Zg (humedales geotérmicos) y Zk(b) (sistemas kársticos subterráneos).*

- *Las turberas arbustivas o abiertas (bog) y las turberas de gramíneas o carrizo (fen) (pertenecientes principalmente a la categoría U de Ramsar, turberas no arboladas) están muy extendidas y se distribuyen desde las tierras bajas hasta las altitudes montañosas y alpinas con una vegetación muy diversa. Las turberas pueden estar dominadas por pastizales, arbustos enanos o musgos. A gran altitud se encuentran especies adaptadas (a menudo endémicas), como en el caso de los páramos afromontanos (África oriental) o de los altos Andes.*

Por otra parte, esta misma Resolución de Ramsar, menciona los rasgos más importantes de las turberas que son:

- a) carácter único del fenómeno de formación de la turba y de sus funciones ecológicas y de recursos naturales;*
- b) dependencia de los "peatlands" y los "mires" en relación con su hidrología e hidroquímica;*
- c) interdependencia entre los "peatlands" y los "mires" en relación con sus cuencas de captación y adyacentes;*
- d) carácter único de su vegetación;*
- e) suministro de hábitat para especies particulares de fauna y de flora;*
- f) funciones de regulación hídrica y efecto tampón;*
- g) capacidad para regular los climas locales y regionales;*
- h) capacidad de secuestrar el carbono de la atmósfera y almacenarlo durante largos períodos de tiempo; y*
- i) capacidad de actuar como archivos geoquímicos y paleoarchivos.*

En base al criterio de estudio e incluso por quien realiza una clasificación se puede distinguir numerosos tipos de turberas. En términos generales se pueden agrupar en clasificaciones que contemplan características superficiales, profundas, ambas u otros elementos (Blanco & Balze, 2004).

1.1.7. Las turberas y su rol ante la variabilidad climática

Es común confundir los conceptos sobre variabilidad y cambio climático. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define al cambio climático como la "variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que

persiste durante una escala temporal mayor”. Por otro lado, en la variabilidad climática, hace referencia a las “variaciones en las condiciones climáticas medias, en escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular, que puede ser manifestada, por ejemplo, por fenómenos naturales como el evento cálido de El Niño y su contraparte fría, conocidos como El Niño Oscilación Sur (ENOS)” (IPCC, 2007; Poleo, 2016).

Sin embargo, se hace referencia, mayormente al tema del cambio climático debido a que es considerado uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la sociedad a nivel mundial. El cambio climático representa un peligro para todos los ecosistemas, porque conlleva al aumento de la temperatura media del planeta, como resultado del incremento de los gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O), que son de origen principalmente antrópico. En esta dinámica, el suelo, como almacén de carbono orgánico, ejerce una función clave. Por lo tanto, radica su importancia y estudio en los ecosistemas como reguladores del carbono en el suelo (Burbano-Orjuela, 2018; Domínguez et al., 2021).

En 2019, el PCC definió que la conservación y restauración de turberas representa una alternativa de impacto para mitigar las emisiones de carbono hacia la atmósfera (IPCC, 2007). Por lo que, desde hace unos años atrás se viene promoviendo a las turberas como parte de las Soluciones Climáticas Naturales o Soluciones Basadas en la Naturaleza que busca la conservación, restauración y el manejo adecuado del suelo, para incrementar la capacidad del almacenamiento de carbono; así como, la disminución de los GEI en diferentes ecosistemas como bosques, turberas, pastizales, entre otros (IPCC, 2007, Iturraspe, 2015; Domínguez et al., 2021).

Las turberas poseen características biológicas, físicas y químicas que las convierten en bancos de datos climáticos valiosos para comprender el impacto del cambio climático actual en los ecosistemas, por otra parte, la variabilidad climática aumenta la vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hídricos de las turberas (Iturraspe, 2015). Es importante entender la velocidad de acumulación de carbono que han mantenido las turberas a lo largo de los años como su capacidad para seguir acumulando carbono. Esta información es fundamental para definir el papel que juegan estos ecosistemas en el ciclo global de carbono, es decir, si actúan como sumideros de carbono o son fuentes emisoras netas. Además, a través de las tasas de

acumulación de turba, podemos evaluar la vulnerabilidad de una turbera frente a la variabilidad climática regional y el cambio climático (Iturraspe, 2015; Domínguez et al., 2021).

1.1.8. Las turberas de altura en Costa Rica

En Costa Rica las turberas de altura se extienden aproximadamente a partir de los 2400 a 3100 m.s.n.m (León y Reyes, 2018). Están ubicadas en la Cordillera de Talamanca; y se distribuyen entre el Parque Nacional Tapantí- Macizo de la Muerte y la Reserva Biológica Cerro Vueltas, en el denominado Cerro de la Muerte. Es un área bastante heterogénea en cuanto a ambientes y ecosistemas, lo ha condicionado el desarrollo de gran número de asociaciones vegetales, como las turberas y los páramos, típicos de los ambientes andinos (Chaverri y Cleef, 1996). La vegetación se caracteriza por ser de origen andino, presentando importantes adaptaciones a diferentes condiciones del clima, alta radiación solar y presentan algún grado de endemismo (Bermúdez, 2000; Chaverri y Cleef, 1996).

Las turberas de altura poseen suelos mal drenadas, periódicamente inundadas, y están ubicadas en los pisos altitudinales de los bosques montano-bajos y montano-altos, dominados por robles y encinos (*Quercus* spp), y mantienen una gran similitud en estructura y composición florística con los páramos que están por encima de los 3100 m.s.n.m (Brak et al, 2005).

Las turberas de la cordillera de Talamanca fueron declaradas sitio Ramsar por el Estado en el 2003, poseen una extensión de 192 520 hectáreas. Estas incluyen el Parque Nacional Chirripó, la Reserva Forestal Los Santos y el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte. Es una zona bastante heterogénea en cuanto a ambientes y forman parte del ecosistema boscoso, que constituye un inmenso corredor biológico más grande del país que facilita el desplazamiento altitudinal y longitudinal de especies de flora y fauna, situación que ha condicionado el desarrollo de gran número de asociaciones vegetales (Chaverri y Cleef, 1996; León y Reyes, 2018; Soto, 2015).

La inaccesibilidad a muchos sitios de páramo y turberas, principalmente en la Cordillera de Talamanca, y el hecho de que estos ecosistemas no son parte de un área considerable de las zonas protegidas del país, ha influenciado la falta de colecciones biológicas, y los estudios ecológicos de largo plazo (Kapelle y Horn 2005).

1.1.9. Marco jurídico en relación con la conservación y protección de humedales en Costa Rica.

La Constitución Política y Jurídica del país, reconoce que los humedales son elemento integrante del ambiente, como lo menciona en los artículos 21, 89 y 50 de la Constitución Política, así como de la aplicación directa del Derecho Internacional Ambiental, ratificado por el país. El artículo 21 establece el derecho a la vida y a la salud. El artículo 89 define entre los fines culturales de la República, el proteger las bellezas naturales. El artículo 50 completa la tutela definiendo un ambiente sano y ecológicamente equilibrado para los habitantes del país, por lo que manda al Estado a garantizar, defender y preservar ese derecho y encomienda a las leyes nacionales a determinar las responsabilidades y las sanciones correspondientes (Aguilar y Rodríguez, 2016).

Actualmente, existe información sobre la identificación y ubicación de los diferentes tipos de humedales mediante la confección del Inventario Nacional de Humedales realizado en 1998, el cual fue elaborado por el Ministerio de Ambiente y Energía- Sistema Nacional de Áreas de Conservación y la oficina Regional de la UICN-ORMA. A través de este documento se conoce que existen alrededor de unos 359 humedales distribuidos en todo el territorio nacional, además como se mencionó anteriormente el país tiene designados 12 humedales de importancia internacional declarados como sitios Ramsar, lo que compromete al Estado a dar protección, emitir políticas públicas y acciones para gestionar la conservación y uso de los humedales conforme a los compromisos adquiridos con estos ambientes. Por otra parte, en 2018, se actualizó y elaboró el nuevo Inventario Nacional por el Proyecto Humedales, coordinado por el Programa Nacional de Humedales -SINAC (Proyecto Humedales de SINACPNUD-GEF, 2018).

Por otro lado, en el país cuenta con una Política Nacional de Humedales publicada en el 2017, que busca brindar acciones de las principales problemáticas en una escala temporal, vinculando el tema ambiental al tema del desarrollo, buscando atender, mediante distintos mecanismos, no sólo a los ecosistemas, sino a las poblaciones humanas vinculadas a estos ecosistemas. Por otro lado, hay importantes vacíos de información por falta de claridad en las normativas relacionadas a la conservación y protección de los humedales en el país, que son necesarias de aclarar para poder implementar efectivamente la Política Nacional de Humedales y sus objetivos. (Sistema Nacional de Áreas de Conservación 2017, Aguilar y Rodríguez 2016).

Dentro de los compromisos para la protección de las turberas en el país, se menciona la aprobación en la XII Reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención de Ramsar sobre Humedales (COP12), en la sección sobre las turberas, el cambio climático y el uso racional (Ramsar, 2002a), donde se alienta a las Partes Contratantes, según proceda, a plantearse la

posibilidad de limitar las actividades que conducen al drenaje de las turberas y pueden causar su colapso, inundaciones y la emisión de gases de efecto invernadero, e insta a que haya una mayor cooperación internacional, asistencia técnica y creación de capacidad para abordar estas cuestiones (Ramsar, 2002a; Aguilar y Rodríguez, 2016; Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2017). Además se hace un llamado a las Partes Contratantes, según proceda, a designar como Humedales de Importancia Internacional al menos una zona de turberas que también sea apta para la comunicación, educación y concienciación acerca de la conservación, la restauración y el uso racional de las turberas y de los servicios que brindan, como por ejemplo su papel en relación con el cambio climático, la protección de los hábitats de especies raras y amenazadas y el suministro de agua (Aguilar y Rodríguez, 2016).

Todos estos mecanismos de protección de los humedales en el país son necesarios para su mayor protección, pero además, se requiere información técnica que oriente a la toma de decisiones; es así que el Proyecto Humedales desde sus inicios (octubre 2014), propuso el desarrollo de instrumentos técnicos e investigaciones de campo que generen información científica, pertinente y necesaria para la toma de decisiones en materia de gestión integral de los humedales (Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2017).

Las turberas de alturas son los únicos humedales de este tipo en el país, y es urgente brindar mayor relevancia por su aporte a la recarga acuífera que generan para abastecer a la población en ambas vertientes del país (Caribe y Pacífica), captura de carbono y otros servicios. Actualmente, se conoce que existen aproximadamente más de 1500 de estos humedales por encima de los 2000 m.s.n.m., que abarcan más de 113 hectáreas en toda la cordillera de Talamanca (Soto 2015; Bermúdez 2000, Chaverri y Cleef 1996). Los más conocidos son lagos y lagunas, la gran mayoría (incluyendo el más grande) son pantanos, sea en forma de turberas o de lagunas estacionales; que cumplen una función importante en la regulación climática e hídrica, además de considerarse un reservorio de carbono (Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2017).

A pesar de tener estos diferentes mecanismos informativos, de protección, y conservación, falta mucho por hacer por las turberas de altura, porque se desconocen muchas de las funciones ecológicas que estos realizan para la mitigación frente a la variabilidad climática. Se desconoce la dinámica ecológica de las turberas de altura, y en general existen vacíos de información básica de estos humedales para apoyar su protección.

1.1.10. Amenazas de los humedales en Costa Rica

A pesar de su importancia, las turberas como humedales, cumplen un papel importante en el control hidrológico y en el mantenimiento de la diversidad biológica. Las turberas están sujetas a procesos de degradación naturales y antropogénicos (Martínez et al, 2009).

Sin embargo, ante los posibles pronósticos de la variabilidad climática, como se mencionó anteriormente, es esencial aplicar medidas concretas y rápidas sobre la conservación de las turberas de altura (Ahumada et al, 2011). La principal problemática de las turberas es la falta de aplicación de políticas diseñadas para conservar los humedales, en esencial los humedales de altura.

De acuerdo con el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2017), el país cuenta con antecedentes en la conservación de los humedales desde ya hace varias décadas, los instrumentos elaborados para la protección y conservación de los humedales se muestran en:

- Ley de Aguas de 1942 la cual establece áreas de protección en la zona costera, ríos, lagunas, lagos, entre otros.
- Ley N°6043 de 1977 sobre la Zona Marítimo Terrestre establece una franja de 200 metros a partir de la pleamar ordinaria que constituye parte del Patrimonio Natural del Estado.
- Ley N° 7317 de 1992 sobre Conservación de la Vida Silvestre, introduce el término de “Humedal” a nivel legal y asigna dentro de las funciones de la Dirección General de Vida Silvestre (ahora Sistema Nacional de Áreas de Conservación al unificarse en la Ley N° 7788 de Biodiversidad en el artículo 22), la responsabilidad de administrar, supervisar y proteger los humedales.
- Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Ramsar), adquiere disposiciones de carácter de Ley de la Republica.
- Inventario Nacional de Humedales de Costa Rica realizado en 1998.

Existe información de manera general sobre la mayoría de los humedales en Costa Rica, y a pesar de que todos los humedales, sean o no declarados por el Estado, formen parte o no de áreas silvestres protegidas, o del Patrimonio Natural del Estado, o aun los que están en propiedad privada, por ser declarados de interés público deben ser protegidos (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, 2017).

Pese a ello, aún hay humedales que subsisten a pesar del poco interés político, limitada vigilancia y los mínimos recursos que destina el Estado para su conservación y protección (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, 2017). Entre algunas de las amenazas que tienen los humedales están: el cambio de uso de suelo (cultivo de piña), contaminación hídrica, desvío de cauces de ríos, drenajes, débil gestión política y estatal, entre otros. Si se cambian las características ecológicas de un humedal, la consecuencia es el deterioro de cualquiera de sus componentes físicos, químicos o biológicos del ecosistema y de sus interacciones (Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2017).

En la actualidad el país dispone de muy poca información o una línea base de estos ecosistemas que haya sido utilizada como una herramienta para la protección de éstos. Se han realizado esfuerzos aislados, y elaborado metodologías y objetivos diferentes, para incrementar la conservación de los humedales, por lo que se tiene un Inventario de humedales de 1998, Inventario de Cuerpos de Aguas Continentales del 2005, ECOMAPAS y el ATLAS-TEC del 2008, los mismos que no han sido utilizado sistemáticamente como instrumento para el ordenamiento territorial (Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2017).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas del Cerro de la Muerte mediante el uso de indicadores biológicos y fisicoquímicos, para el fortalecimiento de su conservación y adaptación a la variabilidad climática.

2.2. Objetivos específicos

1. Describir las características biológicas de las turberas de altura mediante el uso de la avifauna, para la determinación de los cambios estructurales del hábitat.
2. Determinar la composición de macroinvertebrados en los cuerpos de agua superficiales de las turberas como indicadores de calidad del agua.
3. Caracterizar el suelo de las turberas mediante la utilización de parámetros fisicoquímicos para la documentación de los componentes que lo forman.

3. Síntesis

El conocimiento de la estructura y la calidad ambiental de las turberas ofrece una visión de la diversidad de aves en turberas de altura, la calidad del agua y la caracterización del suelo turboso, resaltando su importancia ecológica y su valor para la conservación. Los objetivos específicos desarrollados tienen relación directa en cada uno de los artículos publicados y responden de manera secuencial para dar respuesta al objetivo general propuesto en esta investigación. Los resultados permiten sentar las bases para futuros estudios y estrategias de manejo destinadas a proteger y conservar los ecosistemas en las tierras altas de Costa Rica. Los resultados de esta investigación fueron publicados como:

Artículo 1: Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, publicado en la revista UNED Research Journal de Costa Rica, en el año 2021.

Artículo 2: Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura, Costa Rica, publicado en la Revista de Biología Tropical de Costa Rica, en el año 2023.

Artículo 3: Las turberas de altura del Parque Nacional Tapantí en Costa Rica: caracterización e importancia del suelo turboso, publicado en la revista Terra Latinoamericana de México, en el año 2023.

Artículo 1

En este artículo analiza la distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en las turberas de altura de Costa Rica y conocer los cambios estructurales del hábitat. Se identificaron 75 especies de aves en ocho turberas a diferentes altitudes, destacando la mayor diversidad a 2400 metros de altitud. Se observó que el 43 % de las especies son endémicas, el 34 % son residentes, el 14 % son migratorias latitudinales, y el 9 % son migratorias con poblaciones residentes en el país. Se registró diferencias entre la diversidad de aves y las estaciones climáticas (seca y lluviosa), por lo que la falta de agua en las turberas y los cambios en la fenología de la vegetación podrían reducir los recursos alimenticios y algunas especies de aves realizan desplazamientos altitudinales en busca de recursos. Estos hallazgos resaltan la importancia de las turberas de altura para la supervivencia del endemismo local y sugieren la necesidad de un monitoreo a largo plazo, especialmente en el contexto de la variabilidad climática.

Artículo 2:

Este artículo detalla la composición de macroinvertebrados y su relación con la calidad del agua en las turberas de altura. Los macroinvertebrados desempeñan un papel fundamental como indicador de la calidad del agua en estos ecosistemas. Se registró un total de diez familias correspondientes a siete géneros, en ocho turberas. Las familias más representativas fueron Chironomidae y Limnephilidae. Se utilizaron sustratos artificiales para ser colonizados por macroinvertebrados. Además, se realizaron evaluaciones fisicoquímicas periódicas del agua durante la estación lluviosa. Se utilizaron los índices ICA-NSF y BMWP-CR para evaluar la calidad del agua. De acuerdo con estos índices, la calidad del agua se clasificó según el ICA-NSF como de "calidad media" y de "calidad regular a mala" según el BMWP-CR. Las turberas de altura son ecosistemas poco estudiados, esta investigación evidencia la necesidad de diseñar metodologías e índices que evalúen la fauna acuática. Las turberas son diferentes entre sí, y las familias de macroinvertebrados encontrados son tolerantes a las características fisicoquímicas del agua.

Artículo 3:

En este artículo se caracteriza la vegetación y el suelo de las turberas de altura para aportar información sobre el suelo turboso y conocer el contenido de materia orgánica. Se tomaron muestras de suelo en cuatro turberas a diferentes profundidades (20, 30 y 60 cm), en un gradiente que van desde los 2400 a 3100 m.s.n.m. Además, se realizaron análisis físicos y químicos del suelo, y se describió la vegetación de las turberas para conocer su relación. Se demostró que los suelos en las turberas corresponden al orden histosoles que predominan en zonas frías y pantanosas. La caracterización de la vegetación estuvo representada por plantas vasculares y briófitos en especial del género *Sphagnum* y líquenes, que contribuyen a la formación del suelo turboso. El porcentaje de carbono y materia orgánica fue alto en la turbera 3 con 32.9 % y 47.1 % respectivamente con respecto a las otras turberas, mientras que la relación carbono nitrógeno (C/N) fue mayor en la turbera 1 con un 22.3 %. Las turberas son eficientes en acumular carbono en el suelo debido a la materia orgánica que se acumula.

4. Artículo 1

Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica

Gastezzi-Arias, P., Martínez Araya, D., & Jones Román, G. (2021). Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 13(2), e3716. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i2.3716>

Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica

Paola Gastezzi-Arias^{a,b*}, Daniel Martínez-Araya^c y Gabriela Jones-Román^d

^a Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Costa Rica (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-0663-7446>, correo electrónico pgastezzi@uned.ac.cr

^b Laboratorio de Vida Silvestre y Salud, Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia.

^c Unión de Ornitólogos de Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-7532-8727>, correo electrónico jacamerops@yahoo.com

^d Laboratorio de Ecología Urbana, Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia. <https://orcid.org/0000-0002-1363-4024>, correo electrónico: gjones@uned.ac.cr

RESUMEN. “Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica”. **Introducción:** Las turberas de altura juegan un papel importante en el mantenimiento de la biodiversidad y funcionamiento de los procesos ecológicos locales. En Costa Rica, la información sobre la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura es escasa. **Objetivo:** Analizar la distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura. **Métodos:** Muestreamos cuatro sitios entre 2400 y 3100 metros de altitud. Establecimos tres puntos de observación en cada sitio, separados por 100 m. El muestreo incluyó la estación seca, transición a lluviosa, lluviosa, y transición a seca (setiembre de 2018 a setiembre de 2019). El horario de muestreo fue entre las 06:00 y las 09:00 y utilizamos dos métodos: recuento de puntos y búsqueda en área. **Resultados:** Identificamos 75 especies (25 familias, 11 órdenes), en ocho turberas. Encontramos la mayor diversidad ($H'=3,12$) y riqueza de aves (49 especies observadas y 56 esperadas) en turberas a 2400 metros de altitud, y la menor a 2600 y 2800 metros. Encontramos que el 43 % de las especies en todos los gradientes son endémicas, el 34% residentes de y el 14 % migrantes latitudinales. **Conclusiones:** La gran diversidad de aves en estas turberas de altura demuestra que son ecosistemas necesarios para la supervivencia y mantenimiento del endemismo local. Recomendamos monitorear las aves a largo plazo para detectar cambios en las comunidades de aves, particularmente con el cambio climático actual.

Palabras clave: biodiversidad, humedales, ecosistemas, conservación, comunidad

ABSTRACT: "Altitudinal distribution of bird richness and diversity in high altitude peatlands, Costa Rica". **Introduction:** Highland peatlands play an important role in the maintenance of biodiversity and in the functionality of highland ecological processes. In Costa Rica, information on the richness and diversity of birds in high altitude peatlands is scarce. **Objective:** To analyze the altitudinal distribution of bird richness and diversity in high altitude peatlands. **Methods:** We sampled four different altitudinal sites between 2400 to 3100 m. Three observation points were established at each site, each separated by 100 m. The sampling included the dry season, transition to rainy, rainy and transition to dry (September 2018 to Sept. 2019). Sampling hours were between 06:00 and 09:00 and we used two methods: point count and area search. **Results:** We identified 75 species (25 families, 11 orders), in eight peatlands. We found the highest diversity ($H'=3,12$) and richness of birds (49 species observed and 56 expected) in peatlands at 2400m altitude, and the smallest bird richness at 2600 and 2800 m. We found 43 % of bird species in all gradients to be endemic, 34 % highland residents, and 14 % latitudinal migrants. **Conclusions:** The high diversity of birds in these high altitude peatlands demonstrates that they are necessary ecosystems for the survival and maintenance of highland endemism. We recommend long-term bird monitoring to detect changes in bird communities, particularly with current climate change.

Key words: biodiversity, wetlands, ecosystems, conservation, community

INTRODUCCION

En las tierras altas de Costa Rica existen humedales que están representados por cuerpos de agua como ríos, lagunas, lagos y turberas. Estas últimas son importantes para mantener la funcionalidad de los procesos hidrológicos, ecológicos y biológicos de las tierras altas y por ser depósitos de materia orgánica en descomposición, producida por plantas adaptadas a vivir en condiciones de saturación permanente de agua, con reducido contenido de oxígeno y pocos nutrientes (Blanco & Balze, 2004; León & Reyes, 2017).

En Costa Rica, las turberas de altura se ubican en la Cordillera de Talamanca, en un gradiente altitudinal que va desde los 2400 hasta los 3400 m.s.n.m aproximadamente. A pesar de su importancia y del hecho de estar protegidas dentro de figuras de conservación que incluyen sitios Ramsar (Cleef & Chaverri, 1996). Por otra parte, en el país existen vacíos de información ecológica y biológica sobre estos ecosistemas. Las investigaciones sobre turberas realizadas son muy puntuales y se limitan a descripciones de las comunidades vegetales, y generalidades específicas relacionadas a sus características ecológicas (Cleef & Chaverri, 1996; Bermúdez & Sánchez 2000).

En países como Chile, Perú, Argentina, Colombia, Ecuador y Bolivia, los páramos, las turberas y los bofedales, han sido estudiados para salvaguardar su biodiversidad por ser ecosistemas frágiles vinculados a las dinámicas hídricas, cumplir funciones como la de acumular carbono, y por prestar servicios ecosistémicos relevantes. En Costa Rica se ha prestado atención y enfocado los esfuerzos de conservación a los páramos, por lo que las turberas de altura han quedado rezagadas de esos esfuerzos, y por ende se hace necesario generar información científica sobre su biodiversidad.

Investigaciones sobre turberas en Latinoamérica, demuestran que son ecosistemas vulnerables a los efectos del cambio en el clima local (Rodríguez & Granados 2017) y en especial a las perturbaciones antropogénicas (cambio de uso del suelo), lo que podría producir un desequilibrio en el funcionamiento ecosistémico y, como consecuencia, la reducción de la riqueza y diversidad de las especies que habitan en ellas, además una disminución en la calidad de los servicios ecosistémicos que proporcionan (Buytaert et al., 2011).

La evaluación de comunidades biológicas permite conocer la dinámica poblacional y ecológica en un ecosistema, lo cual a su vez conlleva a desarrollar esfuerzos de conservación y favorece la gestión de la biodiversidad. Para esto, existen parámetros como la riqueza y diversidad de especies, muy utilizados en estudios de ecología de comunidades y de biología de la conservación (Loaiza, 2017; Rodríguez & Granados, 2017).

El uso de indicadores biológicos para monitorear los ecosistemas de altura es clave porque éstos nos dan información del estado actual de los hábitats; información necesaria para diseñar estrategias de protección y para la designación de áreas prioritarias para su conservación y gestión (Rodríguez-Arias & Silva-Benavides, 2017). En este contexto, las aves han sido utilizadas como indicadores biológicos en muchos estudios por ser un grupo diverso, con una historia natural y ecología bien documentadas, están presentes en varios ecosistemas y se conocen sus patrones de comportamiento en los diferentes ecosistemas donde se encuentran (González et al., 2003; Villegas & Garitano-Zavala, 2008; Loaiza, 2017; Rodríguez & Granados, 2017).

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar la distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura -como ecosistemas de alto valor ecológico aunque poco estudiados en el país- con la finalidad de (i) caracterizar por primera vez la avifauna de las turberas de altura en Costa Rica, (ii) destacar su importancia en función a la diversidad de aves de tierra altas, incluyendo endemismos y (iii) establecer una línea base para el uso futuro estos parámetros como indicadores del estado de conservación de las turberas.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en ocho turberas que se localizan en el Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte (09,55478°N, -83,75962°W) (T1, T2, T3, T4, T5 y T6), y en la Reserva Biológica Cerro Vueltas (09,62169°N, -83,85669°W) (T7 y T8) (Fig. 1). Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo con dos turberas por sitio, a diferentes altitudes que van desde los 2400 a los 3100 m, por su fácil acceso y por presentar cuerpos de agua visibles. Además, fueron ubicados a diferentes altitudes que van desde los 2400 a los 3100 m.s.n.m.

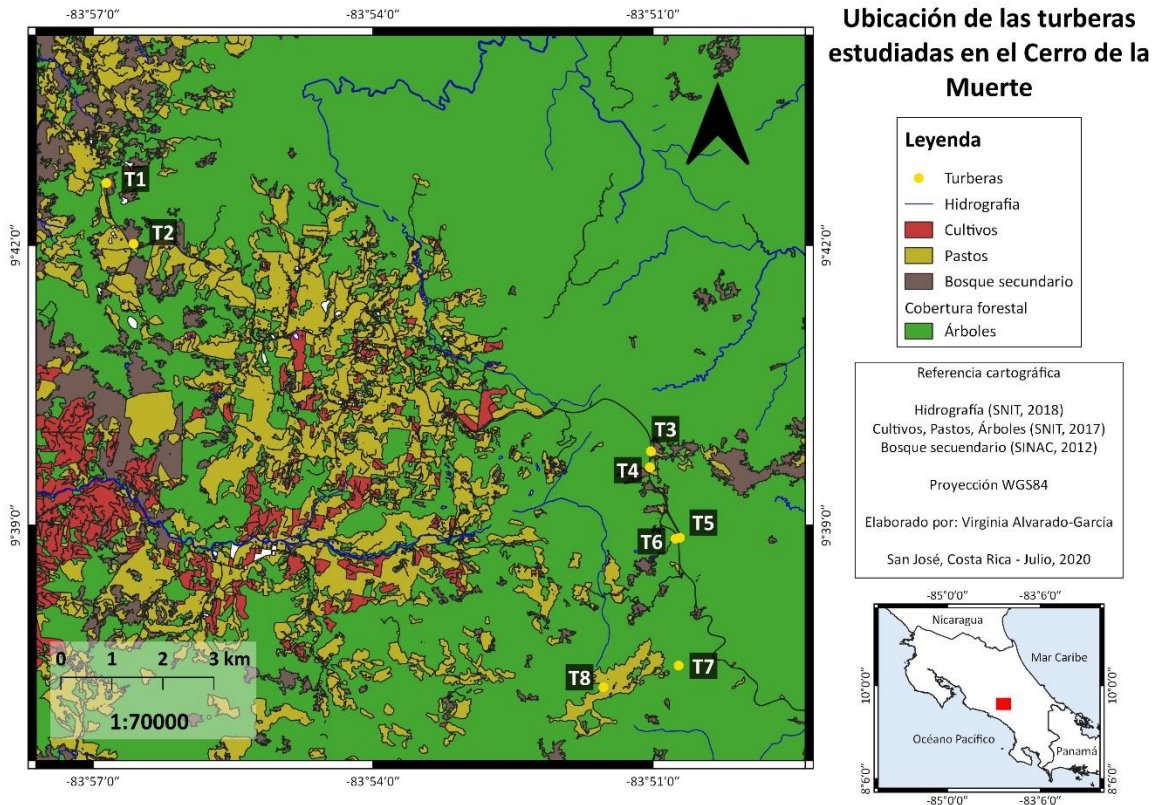


Fig. 1. Ubicación de las turberas estudiadas a diferentes altitudes.

En cada turbera se establecieron tres puntos de observación separados por 100 m cada uno (Arévalo, 2014; Kazuya et al., 2014). El muestreo se realizó por el método de conteo por puntos con un radio de observación determinado de 30 m aproximadamente. Para complementar las observaciones se realizó una búsqueda intensiva dentro de cada turbera. La búsqueda intensiva es un método que consiste en efectuar una serie de conteos meticulosos, donde el observador recorre un área determinada en busca de aves, para aumentar la probabilidad de detección de aquellas especies particularmente inconspicuas o silenciosas (Ralph et al., 1996).

Los muestreos se realizaron entre septiembre del 2018 y septiembre de 2019, se incluyó la estación seca, transición a lluviosa, lluviosa y transición a seca. Las horas del muestreo fue entre las 06:00 a 09:00. En cada punto de conteo se realizó una observación de 10 minutos; así, cada visita, duró 50 minutos en cada turbera, dado que la búsqueda intensiva duró 20 minutos. Se contabilizaron todos los individuos por

especie, y registraron todas las aves dentro de los límites de cada punto de conteo; utilizamos binoculares Vortex de 10x40 para las observaciones. Los cuatro sitios de muestreo fueron visitados una vez por mes, realizando un esfuerzo de muestreo de 105,6 horas.

Para el análisis estadístico, se generaron curvas de acumulación de especies basadas en las especies observadas (Sobs) con el programa EstimateS 9.1.0 (Colwell, 2019) con el fin de conocer la riqueza de aves entre los diferentes pisos altitudinales. Con el mismo programa se calculó la riqueza de especies de aves estimada por medio del estimador no paramétrico Bootstrap -es un estimador que arroja resultados más precisos al estimar la riqueza de ensamblajes con gran cantidad de especies raras- (Colwell et al., 2004; Magurran, 2004).

Se calcularon los índices de riqueza específica, diversidad de Shannon-Wiener y dominancia de Berger-Parker con el programa Species Diversity & Richness 4.1.2 (Seaby & Henderson, 2006) para comparar de la diversidad de las aves entre los meses de muestreo, estratos altitudinales y las estaciones climáticas. Además, se calcularon los intervalos de confianza al 95% de los estimados mediante procedimientos “bootstrapping” y se efectuaron pruebas de aleatorización (randomization tests) para realizar comparaciones estadísticas (Solow, 1993).

Para evaluar el grado de recambio de especies entre los ensamblajes de aves en las diferentes altitudes y las estaciones climáticas, se utilizó el índice de disimilitud de Bray-Curtis con las abundancias relativas de las especies. Los valores obtenidos a partir del índice de disimilitud varían desde cero, cuando dos grupos son idénticos en composición de especies, hasta uno, cuando las especies de ambos grupos son completamente distintas (Colwell & Coddington, 1994). Para evaluar si existían diferencias estadísticas en entre las diferentes altitudes y estaciones climáticas se realizó un análisis PERMANOVA, junto con análisis de comparaciones múltiples a posteriori. Finalmente, mediante un análisis SIMPER se identificaron a las principales especies responsables de la disimilitud entre la composición de los ensamblajes de aves en las diferentes altitudes

y las estaciones climáticas. Estos análisis se realizaron con el paquete “vegan” en el programa R versión 3.5.2 (Oksanen et al., 2019).

RESULTADOS

Se registraron un total de 75 especies de aves, pertenecientes a 25 familias y a 11 órdenes (Tabla 1). Además, se encontró que el 43 % de las especies en las diferentes altitudes son endémicas, el 34% residentes de las tierras altas y el 14 % migratorias latitudinales (Fig. 2). Por otro lado, las familias mejor representadas en este trabajo fueron Tyrannidae con un 17 %, Trochilidae 15 %, y las familias Hirundinidae, Turdidae, Passerellidae y Parulidae con un 14 % cada una. Por otra parte, la mayoría de las especies de aves son insectívoras (36 %), seguidas por las frugívoras (11 %). Las aves observadas en las diferentes altitudes no son exclusivas de las turberas de altura, pero algunas como las migratorias altitudinales usan estos ecosistemas para suplir sus requerimientos biológicos como alimentación, anidación, reproducción, y refugio.

TABLA 1

Listado de las especies de aves identificadas y observadas en las turberas de altura del Cerro de la Muerte, Costa Rica.

Familia	Especie	Nombre común	Condición de la especie	Grupo trófico
Odontophoridae	<i>Dendrortyx leucophrys</i>	Perdiz montañera/ chirrascuá	R	F,I,G
Columbidae	<i>Patagioenas fasciata</i>	Paloma collareja	R	F
Apodidae	<i>Streptoprocne zonaris</i>	Vencejón collarejo	R	I
Trochilidae	<i>Colibri cyanotus</i>	Colibrí orejivioláceo verde	R	N,I
	<i>Eugenes spectabilis</i>	Colibrí magnífico	END	N,I
	<i>Panterpe insignis</i>	Colibrí garganta de fuego	END	N,I
	<i>Lampornis castaneiventris</i>	Colibrí montañes Gorgiblanco	END	N,I
	<i>Lampornis</i> sp.	Colibrí montañes	END	N,I
	<i>Selasphorus flammula</i>	Colibrí chispita volcanera	END	N,I
	<i>Selasphorus scintilla</i>	Colibrí chispita gorginaranja	END	N,I
Scolopacidae	<i>Tringa solitaria</i>	Andarríos solitario	M	C,I
Cathartidae	<i>Coragyps atratus</i>	Zopilote negro	R	O,C
	<i>Cathartes aura</i>	Zopilote cabecirrojo	R, M	O,C
Accipitridae	<i>Elanoides forficatus</i>	Elanio tijereta	R, M	F,I
	<i>Accipiter bicolor</i>	Gavilán bicolor	R	C
	<i>Buteo swainsoni</i>	Gavilán de swainson	M	C
	<i>Buteo platypterus</i>	Gavilán aludo	M	C,I

	<i>Buteo jamaicensis</i>	Gavilán colirrojo	R, M	C
Trogonidae	<i>Pharomachrus mocinno</i>	Quetzal	R	F,I,C
Picidae	<i>Melanerpes formicivorus</i>	Carpintero careto	R	F
	<i>Dryobates villosus</i>	Carpintero serranero	R	F,I
Falconidae	<i>Falco ruficularis</i>	Halcón cuelliblanco	R	C
Psittacidae	<i>Pyrrhura hoffmanni</i>	Perico aliazufrado	END	F
	<i>Bolborhynchus lineola</i>	Perico listado	R	F
Rhinocryptidae	<i>Scytalopus argentifrons</i>	Tapaculo	END	I
Furnariidae	<i>Pseudocolaptes lawrencii</i>	Trepamusgo cachetón	R	I
	<i>Margarornis rubiginosus</i>	Subepalo rojizo	END	I
Tyrannidae	<i>Elaenia frantzii</i>	Elainia montañera	R	F
	<i>Zimmerius parvus</i>	Mosquerito Cejigrís	R	N,F
	<i>Myiodynastes hemichrysus</i>	Mosquero vientridorado	END	F,I
	<i>Contopus cooperi</i>	Pibí boreal	M	I
	<i>Contopus lugubris</i>	Pibí sombrío	END	I
	<i>Contopus sordidulus</i>	Pibí occidental	M,R?	I
	<i>Contopus sp.</i>	Mosquerito	M,R?	I
	<i>Empidonax atriceps</i>	Mosquerito cabecinegro	END	I
Vireonidae	<i>Cyclarhis gujanensis</i>	Vireón cejirrufo	R	I
	<i>Vireo carmioli</i>	Vireo aliamarillo	END	F
Hirundinidae	<i>Riparia riparia</i>	Golondrina ribereña	M	I
	<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Golondrina azul y blanco	R,M	I
	<i>Progne subis</i>	Martín purpúrea	M	I

	<i>Hirundo rustica</i>	Golondrina tijereta	M	I
	<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	Golondrina risquera	M	I
	<i>Petrochelidon fulva</i>	Golondrina cavernícola	A	I
Troglodytidae	<i>Troglodytes ochraceus</i>	Soterrey ocoso	END	I
	<i>Thryorchilus browni</i>	Soterrey de bambú	END	I
	<i>Henicorhina leucophrys</i>	Soterrey de selva pechigrís	R	I
Turdidae	<i>Myadestes melanops</i>	Jilguero	END	F
	<i>Catharus gracilirostris</i>	Zorzal piquinegro	END	I
	<i>Catharus frantzii</i>	Zorzal gorrirojizo	R	I
	<i>Turdus nigrescens</i>	Mirlo negruzco	END	F,I
	<i>Turdus grayi</i>	Yiguirro	R	F,I,C
	<i>Turdus plebejus</i>	Mirlo montañero	R	F,I
Ptilonotidae	<i>Phainoptila melanoxantha</i>	Capulinerro negro y amarillo	END	F,I
	<i>Ptiliogonys caudatus</i>	Capulinerro colilargo	END	F,I
Fringillidae	<i>Chlorophonia callophrys</i>	Clorofonia cejidorada	END	F,I
	<i>Chlorophonia elegantissima</i>	Eufonia capuchiceleste	R	F
	<i>Spinus xanthogastrus</i>	Jilguero ventriamarillo	R	F,I
Passerellidae	<i>Chlorospingus pileatus</i>	Tangara de monte cejiblanca	END	F,I
	<i>Chlorospingus flavopectus</i>	Tangara de monte ojeruda	R	F,I
	<i>Junco vulcani</i>	Junco paramero	END	F,I,G
	<i>Zonotrichia capensis</i>	Comemaíz	R	F,I,G

	<i>Pezopetes capitalis</i>	Saltón patigrande	END	F,I,G
	<i>Atlapetes tibialis</i>	Saltón de muslos amarillos	END	F,I,N
Zeledoniidae	<i>Zeledonia coronata</i>	Zeledonia	END	I
Parulidae	<i>Oreothlypis gutturalis</i>	Reinita garganta de fuego	END	I,F
	<i>Setophaga virens</i>	Reinita cariamarilla	M	I
	<i>Basileuterus melanogenys</i>	Reinita carinegra	END	I,F
	<i>Cardellina pusilla</i>	Reinita gorrinegra	M	I
	<i>Myioborus miniatus</i>	Candelita pechinegra	R	I
	<i>Myioborus torquatus</i>	Candelita collareja	END	I
Cardinalidae	<i>Piranga bidentata</i>	Tangara dorsirrayada	R	I,F
	<i>Pheucticus tibialis</i>	Picogrueso ventriamarillo	END	I,F
Thraupidae	<i>Tangara dowii</i>	Tangara ventricastaña	END	I,F
	<i>Acanthidops bairdi</i>	Fringilo piquiagudo	END	N,I,F,G
	<i>Diglossa plumbea</i>	Pinchaflores plumizo	END	N,I

R: residente, M: migratorio, END: endémico, R,M: residentes y migratorias, A: accidental, M,R?: migratorio reproductivo. C: carnívoro; N: nectarívoro; F: frugívoro; I: insectívoro; O: omnívoro; G: granívoro.

La mayor riqueza de aves en turberas fue encontrada en el estrato de menor elevación (2400 m) con 49 especies observadas, y 56 esperadas. Mientras que, en las elevaciones de 2600 y 2800 metros de altitud, las aves presentaron la menor riqueza, tanto observada como la estimada. La eficiencia del muestreo para los estratos altitudinales 2400, 2600, 2800 y 3100 m.s.n.m, fue de 87,16 %, 88,34 %, 90,90 % y 86,47 %, respectivamente. Las curvas de acumulación de especies realizadas con Sobs (Sp Obser) no se estabilizaron (no alcanzaron la asíntota) al igual que la generadas con el estimador Bootstrap (Fig. 3).

Al comparar la riqueza entre turberas a diferentes altitudes, se observó la mayor riqueza de especies a los 2400 m.s.n.m (49 especies), y la menor a los 2800 metros de altitud (36 especies). Según los análisis de diversidad (índices de Shannon) y dominancia (índice de Berger-Parker), hubo diferencias significativas entre turberas de diferentes altitudes: 2400 (H=3,12), 2600 (H= 2,86) y 2800 (H=2,91). Mientras que, la diversidad y dominancia fue similar entre turberas de los 2400 (H=3,12) y las de los 3100 m.s.n.m (H=3,08) (Tabla 2).



Fig. 2. Especies de aves endémicas representativas de tierras altas de Costa Rica y presentes en las turberas de altura del Cerro de la Muerte. A. *Thryorchilus browni*; B. *Panterpe insignis*; C. *Empidonax atriceps*; D. *Chlorophonia callophrys*. Fotos: Daniel Martínez-Araya.

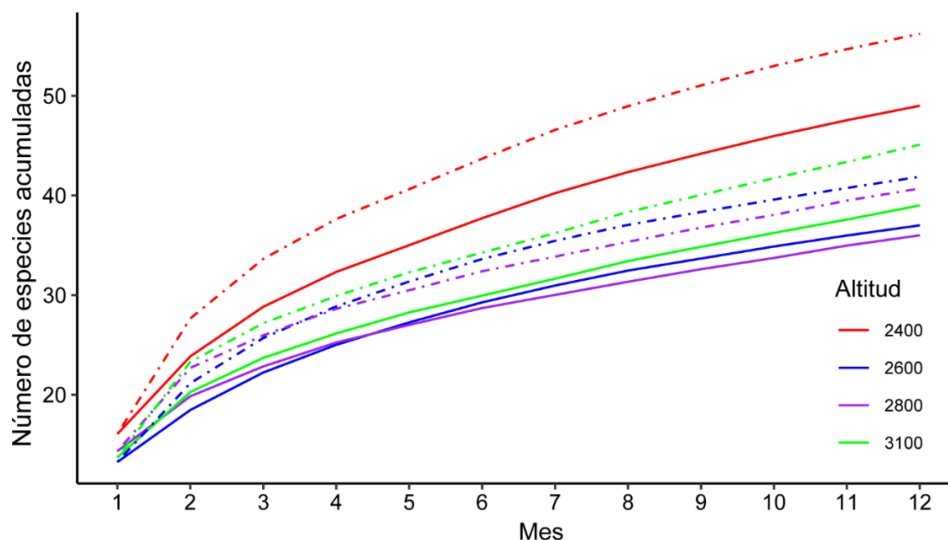


Fig. 3. Curvas de acumulación de la riqueza de especies de aves (líneas continuas) y comparación con la riqueza esperada por el estimador no paramétrico Bootstrap (líneas punteadas) en turberas a diferentes altitudes en función del esfuerzo acumulativo de muestreo (meses).

TABLA 2

Comparación de los índices de diversidad de aves en las turberas de altura en el Cerro de la Muerte 2018 -2019

Índice	2 400	2 600	2 800	3 100
Riqueza de especies	49	37	36	39
Índice de Shannon	3,12 ^a (3,04 – 3,16)	2,86 ^b (2,74 – 2,91)	2,91 ^b (2,79 – 2,96)	3,08 ^a (2,95 – 3,11)
Índice de dominancia Berger-Parker	0,13 ^a (0,12 – 0,16)	0,18 ^b (0,15 – 0,21)	0,20 ^b (0,16 – 0,23)	0,12 ^a (0,10 – 0,15)
Coefficiente de disimilitud (Bray-Curtis)	2 400	2 600	2 800	
2 600	0,27			
2 800	0,35	0,24		
3 100	0,44	0,37	0,35	

* Las letras distintas indican diferencias significativas de las pruebas de aleatorización ($p < 0.05$).

Según el análisis PERMANOVA hay diferencias en la composición de especies entre los ensambles de aves presentes en turberas a diferentes altitudes ($F= 5,39$; $p= 0,001$) y estaciones climáticas ($F= 3,82$; $p= 0,001$). Adicionalmente, según el índice de Bray-Curtis hay una mayor disimilitud de los ensambles de aves entre los 2400 y 3100 m.s.n.m (0,44) con una diferencia significativa ($F=7,76$; $p= 0,006$) (Tabla 3).

TABLA 3
Análisis del modelo PERMANOVA de la distancia Bray-Curtis según el rango altitudinal y estación climática.

Variable	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R ²	P
Altitud	3	1,84	0,61	5,39	0,24	0,001
Estación climática	3	1,31	0,44	3,82	0,17	0,001
Total	47	7,81			1,00	

Por otro lado, según el índice de Bray-Curtis existe una mayor disimilitud de los ensambles de aves entre la estación seca y lluviosa ($F= 4,91$; $p= 0,006$). Mientras que entre la época seca y transición a lluviosa hay mayor similitud ($F= 2,19$; $p= 0,198$). El análisis SIMPER para los ensambles de aves, identificó quince especies de aves como las responsables del 70% de su diferencia, entre ellas el Pinchaflor plumizo (*Diglossa plumbea*), Elainia montañera (*Elaenia frantzii*) y Paloma collareja (*Patagioenas fasciata*). Además, el análisis SIMPER determinó que, en turberas a los 2400 m.s.n.m, las especies dominantes fueron el Soterrey de selva pechigris (*Henicorhina leucophrys*), D. plumbea y Tangara de monte cejiblanca (*Chlorospingus pileatus*), mientras que, en turberas de los 3100 m.s.n.m, fueron el Mirlo negruzco (*Turdus nigrescens*) y Chispita volcanera (*Selasphorus flammula*).

DISCUSIÓN

Las curvas de acumulación de especies reflejaron que la cantidad de muestreos realizados no fueron suficientes para observar la totalidad de las especies de aves durante el periodo de muestreo. Una de las causas de este resultado, es que los muestreos se realizaron en las horas de la mañana, dado que en las tardes las condiciones climáticas del área de estudio no lo permitieron por la presencia de lluvias, fuertes vientos y bajas temperaturas. A pesar de que no se alcanzó la asíntota, se realizó un esfuerzo de muestreo bastante alto (105,6 horas de observación) y se cubrieron todos los meses del año.

La mayor riqueza de aves estimada fue en las turberas de los 2400 m.s.n.m. Barrantes (2005), menciona que en Costa Rica la riqueza de aves de tierras altas y de bosques adyacentes disminuye al aumentar la altitud, y alcanza su punto mínimo en el páramo a 3800 m.s.n.m. Al comparar la diversidad de aves entre turberas a diferentes altitudes, se evidencia que existen diferencias estadísticamente significativas entre las turberas a los 2400, 2600 y 2800 metros de altitud. Una de las posibles razones de este resultado es que, en los 2400 m.s.n.m, las aves poseen mayor disponibilidad de recursos alimenticios en especial para las aves de hábitos alimenticios más generalistas que utilizan insectos y frutas en su dieta, a diferencia de las otras turberas donde existe un mosaico continuo de bosque de altura (premontano, montano y páramo) y las aves son más especialistas en sus dietas.

También, se encontraron diferencias en la diversidad de aves entre las turberas del rango altitudinal más alto (3100 m.s.n.m), con las turberas de los rangos altitudinales intermedios (2600 y 2800 m.s.n.m), para ambos índices (Shannon y dominancia de Berger-Parker). Esto concuerda con lo reportado por Terborgh (1971), y Martínez & Rechberger (2007) donde la diversidad de especies de aves cambia gradualmente desde los 1850 hasta los 3170 m.s.n.m, debido a los cambios en la composición de la vegetación con respecto a la altura, lo que podría estar reflejado en los recursos presentes en cada uno de los rangos altitudinales.

Por otra parte, Terborgh (1971), y Blake & Loiselle (2000) indican que, la diversidad de aves en un rango altitudinal muestra una disminución de la riqueza de aves con respecto al aumento de la elevación y se manifiesta por la disminución de recursos disponibles y por las transformaciones de las condiciones ambientales. Blake y Loiselle (2000), y Loaiza (2017) mencionan que, las comparaciones entre diferentes altitudes podrían ser de importancia para detectar el recambio de especies en las diferentes elevaciones. Sin embargo, en este trabajo se encontró que existe similitud entre la diversidad de aves de las turberas a los 2400 (H= 3,12) y las de los 3100 metros de altitud (H= 3,08), y puede ser debido a que existe una fuerte asociación entre grupos de aves y los diversos tipos de vegetación donde cada grupo presenta diferentes ensamblajes de especies a lo largo de un rango altitudinal.

Según los resultados, la presencia de las aves endémicas registradas en turberas a diferentes altitudes no estuvo determinada por la variación altitudinal. Las turberas se ubican a diferentes altitudes y la distancia entre ellas es de pocos metros aproximadamente (500 m a 1 km), permitiendo que las aves puedan desplazarse entre las franjas de la vegetación continua que existen en estos rangos de altitud. Esto se explica con lo reportado por Terborgh (1971), y Blake & Loiselle (2000), que a altitudes similares o con pocas diferencias en rangos altitudinales, no se puede evidenciar asertivamente la transición de aves de una zona de mediana elevación con mayor diversidad.

La estacionalidad climática en el Cerro de la Muerte es bien marcada, en este trabajo se encontró mayor disimilitud de los ensamblajes de aves entre la estación seca y lluviosa, debido a que en la estación seca la falta de agua en las turberas y los cambios en la fenología de la vegetación, posiblemente reducen los recursos alimenticios y algunas especies de aves realizan desplazamientos entre los diferentes rangos altitudinales en busca de recursos. Las variaciones del paisaje en función de las precipitaciones y la temperatura podrían influir en la disponibilidad de alimento, existiendo una variación significativa de la abundancia de aves entre los periodos seco y lluvioso, con un mayor número de aves durante el periodo de lluvias (Peña-Villalobos et al., 2012).

Las especies *H. leucophrys*, *D. plumbea* y *C. pileatus*, fueron dominantes en términos de abundancia a los 2400 metros de altitud, mientras que, en el gradiente de los 3100 m.s.n.m, fueron dominantes *T. nigrescens* y *S. flammula*, lo que sugiere que estas especies poseen niveles tróficos diversos y a su vez poseen alta representatividad en estos gradientes, lo que evidencia la heterogeneidad de las turberas de altura. Esto concuerda con la distribución altitudinal de las especies de aves en Costa Rica, es así que la distribución de *H. leucophrys*, va desde los 800 hasta los 3800 m.s.n.m, *D. plumbea*, desde 1200 a los 3 800 m.s.n.m, *S. flammula* desde 1200 hasta los 3800 m.s.n.m. *T. nigrescens* desde los 2400 a los 3 800 m.s.n.m, y *C. pileatus* desde los 2000 hasta los 3800 m.s.n.m. Vale la pena destacar que *T. nigrescens*, *C. pileatus*, *D. plumbea*, *S. flammula*, son endémicos de tierras altas de Costa Rica y el oeste de Panamá (Stiles y Skutch, 1989; Garrigues, 2014).

En las turberas se identificaron especies de aves perteneciente a diferentes gremios tróficos, la mayoría fueron insectívoras (36 %), seguidas por las frugívoras (11 %) las cuales se observaron alimentándose de frutos de plantas de las familias Ericaceae, Rubiaceae, Onagraceae, entre otras. Es importante mencionar que se observó al Junco paramero (*Junco vulcani*) y al migratorio Andarríos solitario (*Tringa solitaria*) alimentándose de insectos acuáticos a la orilla de una de las turberas. Por lo que es importante destacar que las turberas altura proveen de recursos alimenticios, refugio y sitios de descanso para muchas especies de aves.

Sandoval & Sánchez (2014), mencionan que en Costa Rica existen un total de 85 especies de aves de alta montaña, de las cuales 37 se consideran endémicas de tierras altas de Costa Rica y el oeste de Panamá, y representan aproximadamente el 9,4 % del total de especies del país. Durante esta investigación se registraron 33 especies endémicas de tierras altas y de distribución reducida, que utilizan las turberas, y las zonas de transición entre el bosque y el páramo, por lo que se puede argumentar que las turberas son ecosistemas para la supervivencia y mantenimiento del endemismo que existe en las tierras altas de la zona.

El uso de las aves como indicadores nos permitió obtener a lo largo de todo el año de muestreo resultados fiables de especies relativamente comunes, endémicas y con distribución restringida de tierras altas, además de detectar especies con alta sensibilidad a los cambios ambientales en el ecosistema como el *J. vulcani*, *Zeledonia coronata*, *Scytalopus argentifrons* y *T. browni* que requieren hábitos específicos del hábitat donde viven (bosque montano y páramo). Lo que podemos afirmar que las turberas brindan esos requerimientos y desempeñan un papel importante para la conservación de las aves, y soportan la funcionalidad de los procesos ecológicos en tierras altas además que proveen los recursos y elementos del hábitat para este grupo de vertebrados.

La carencia de estudios similares en turberas de altura dificulta la comparación de nuestros resultados, por lo que se desconoce si estos siguen un patrón similar en otras turberas de Costa Rica y Latinoamérica. Se concluye que las turberas de la Cordillera de Talamanca albergan por lo menos 75 especies de aves, con un 47 % de endemismo lo que demuestra que estos ecosistemas son de vital importancia para la conservación para las aves de tierras altas y las migratorias latitudinales.

Los resultados justifican la conservación y mayor protección de ecosistemas frágiles como las turberas y es necesario evitar que sufran contaminación, quema o extracción de la flora y fauna. Además, se espera que esta investigación sirva de referencia para el análisis de la riqueza y diversidad de aves en ecosistemas similares al de este estudio. Por lo que, se sugiere realizar estudios que contemplen un análisis ecológico del hábitat donde se encuentran las turberas y realizar monitoreos de aves en tierras altas a largo plazo para detectar cambios en las comunidades de aves y su relación al cambio climático.

REFERENCIAS

Arévalo, E. (2014). Comparación de métodos de conteo por puntos y de bioacústica para el monitoreo de aves. School for Field Studies y Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/273350590>

- Barrantes, G. (2005). Aves de los páramos de Costa Rica. En: M. Kapelle & Horn, SP. (Eds.). Paramos de Costa Rica (pp.521-532). Editorial INBio. Heredia, Costa Rica.
- Blanco, D.E., & De la Balze, V.M. (Eds.). 2004. Los Turbales de la Patagonia: Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad. Publicación No. 19. Wetlands International. Buenos Aires, Argentina. p.5-21.
- Blake, J.G., & Loiselle, B.A. (2000). Diversity of birds along an elevational gradient in the Cordillera Central, Costa Rica. *Revista Auk*, 117(3), 663-686.
- Bermúdez, M. (2000). Identificación de vacíos de información Botánica en Centroamérica. Ediciones WWF. San José, Costa Rica. p.48-51.
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. & Tobón, C. (2011). Potential Impacts of Climate Change on the Environmental Services of Humid Tropical Alpine Regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19-33.
- Colwell, R. K., Chang, X .M & Chang, J. (2004). Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology*, (98), 2717-2727.
- Colwell, R. (2019). EstimateS: statistical estimation of species richness and shared species from samples, version 9.1.0. Recuperado de: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>.
- Cleef, A & Chaverri, A. (1996). Turberas de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. En: Ficha Técnica Turberas de Talamanca. Programa Nacional de Humedales SINAC-MINAE. 10 p.
- Garrigues, R. (2014). *The Birds of Costa Rica. A Field Guide*. Ilus. R. Dean. Ithaca, Nueva York: Zona Tropical Publication.
- González-Ortega, M.A., Guzmán-Hernández, J., Martín-Gómez M.F, Domínguez-Velázquez, L.E. (2003). Un método para la selección de aves bioindicadoras con base en sus posibilidades de monitoreo. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología*, 4(2), 10-16.
- Jaime-Escalante, N., Figueroa-Esquivel, E., Villaseñor-Gómez, J.F., Jacobo-Sapien, E., Puebla-Olivares, F. (2016). Distribución altitudinal de la riqueza y composición de “ensamblajes” de aves en una zona montañosa al sur de Nayarit. México. *Revista Biología Tropical*, 64(4), 1537-1551.
- Kazuya, N., Landívar, C.M, Gómez, M.I. (2014). Monitoreo de las aves para detectar el cambio de la calidad ecosistémica en los bofedales alto andinos. *Revista Ecología en Bolivia*, 49(3), 73-83. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n3/v49n3_a07.pdf

- Loaiza, C. (2017). Dinámica temporal y espacial de la comunidad de aves en un gradiente altitudinal de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, vertiente Caribe. *Revista Caldasia*, 39 (2): 310. [Doi: https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n2.60647](https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n2.60647)
- León-Alfaro, Y. & Reyes-Chaves, J. (2018). Delimitación y descripción biofísica de dos turberas y de una laguna endorreica en el sector Salsipuedes-Cerro Asunción, Parque Nacional Tapantí – Macizo de la Muerte, Costa Rica. *UNED Research Journal*. 10(1), 210-215. [Doi.org/10.22458/urj.v10i1.2030](https://doi.org/10.22458/urj.v10i1.2030)
- Magurran, A.E. (2004). *Measuring Ecological Diversity*. Blackwell Publishing, Oxford. p.256.
- Martínez, O. & Rechberger, J. (2007). Características de la avifauna en un gradiente altitudinal de un bosque nublado andino en La Paz, Bolivia. *Revista Peruana de Biología*, 14 (2), 225-236.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P.R, O'Hara, R.B., Simpson, G.L, Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., & Wagner, H. (2019). *Vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.5-4. Recuperado de: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Peña-Villalobos, I., Fibla, P., Salazar, J.E, & Sallaberry, M. (2012). Cambios temporales en la abundancia y composición del ensamble de aves acuáticas en tranques artificiales en Chile Central. *Revista Gayana*, 76(2), 92-101. [Doi: https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382012000300002](https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382012000300002)
- Ralph, C.J., Geupel, G.R., Pyle, P., Martin, T.E., DeSante, D.F., & Mila, B. (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-159. Albany, CA: Pacific Southwest Section, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. p.44.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de: <http://www.R-project.org/>
- Rodríguez, C., & Granados, I. (2017). Diversidad de aves de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes y su área de amortiguamiento, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 17(1), 74-95.
- Rodríguez-Arias, C., & Silva-Benavides, A.M. (2017). Los Humedales de la Quebrada Estero en San Ramón, Costa Rica: importancia y estado actual. *Posgrado y Sociedad Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado*, 15(1), 13-26. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1822>

- Sandoval, L., & Sánchez, C. (2014). Lista de aves de Costa Rica: décima octava actualización. Unión de Ornitólogos de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Seaby, R.M., & Henderson, P.A. (2006). Species Diversity and Richness Version 4. Pisces Conservation Ltd., Lymington, England.
- Solow, A.R. (1993). A simple test for change in community structure. *Journal Animal Ecology*, 62(1), 191-193.
- Stiles, F.G., & Skutch, A.F. (1989). A guide to the birds of Costa Rica. Ithaca, Nueva York: Cornell University Press.
- Terborgh, J. (1971). Distribution on environmental gradients: Theory and a preliminary interpretation of distributional patterns in the avifauna of the Cordillera Vilcabamba, Peru. *Ecology*, (52), 23-40.
- Villegas, M., & Garitano-Zavala, A. (2008). Las comunidades de aves como indicadores ecológicos para programas de monitoreo ambiental en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Ecología en Bolivia*, 43(2), 146-153. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/230918255>

5. Artículo 2

Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura, Costa Rica

Gastezzi-Arias, P & Rincón, J. (2023). Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. 71: e54605. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.54605>

Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura, Costa Rica

Composition of macroinvertebrates according to water quality in high altitude peatbogs, Costa Rica

Paola Gastezzi-Arias^{1,2} y José E. Rincón³

¹Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Costa Rica (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-0663-7446>, correo electrónico pgastezzi@uned.ac.cr

²Laboratorio de Vida Silvestre y Salud, Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia

³ Departamento de Biología, Facultad Experimental de Ciencias de la Universidad del Zulia, Venezuela. correo electrónico: jerincon04@gmail.com

ABSTRACT

Composition of macroinvertebrates according to water quality in high altitude peatbogs, Costa Rica. **Introduction:** In Costa Rica, high peatbogs are located in the Cordillera de Talamanca from 2 400 to 3 200 m. They are formed from deposits of decomposing organic matter, with reduced oxygen and low nutrient availability. **Objective:** To evaluate the variation in the composition of aquatic macroinvertebrates according to physicochemical parameters of superficial water quality in high altitude peatbogs, Costa Rica. **Methods:** 32 artificial substrates were placed in the peatbogs to be colonized by macroinvertebrates. Monthly physicochemical evaluations of surface water were performed in eight peatbogs with monthly visits during the rainy season. The ICA-NSF and BMWP-CR indexes were used to evaluate the water quality. **Results:** A total of ten families corresponding to seven genera were recorded. The most representative family was Chironomidae and Limnephilidae. Water quality was classified according to the ICA-NSF as “medium quality” and as “regular to poor quality” according to BMWP-CR. **Conclusions:** The high peatbogs are poorly studied ecosystems; this research shows the need to design methodologies and indices to evaluate the aquatic fauna. The peatbogs are different from each other, and the families of macroinvertebrates found are tolerant to the physicochemical characteristics of the water. Periodic studies that evaluate water quality and its relationship with aquatic macroinvertebrates

are necessary to understand the dynamics of peatlands, generate knowledge and increase their protection.

Key words: aquatic insects; artificial substrates; bioindicators; physicochemical parameters.

RESUMEN

Introducción: En Costa Rica, las turberas de altura se localizan en la Cordillera de Talamanca de 2400 a 3200 m.s.n.m. Se forman a partir de depósitos de materia orgánica en descomposición, con oxígeno reducido y baja disponibilidad de nutrientes. **Objetivo:** Evaluar la variación en la composición de macroinvertebrados acuáticos según parámetros fisicoquímicos de calidad del agua superficial en turberas de altura, Costa Rica. **Métodos:** Se colocaron 32 sustratos artificiales en las turberas para ser colonizados por macroinvertebrados. Se realizaron evaluaciones fisicoquímicas mensuales del agua superficial en ocho turberas con visitas mensuales durante la estación lluviosa. Se utilizaron los índices ICA-NSF y BMWP-CR para evaluar la calidad del agua. **Resultados:** Se registraron un total de diez familias correspondientes a siete géneros. Las familias más representativas fueron Chironomidae y Limnephilidae. La calidad del agua se clasificó según el ICA-NSF como de “calidad media” y como de “calidad regular a mala” según el BMWP-CR. **Conclusiones:** Las turberas de altura son ecosistemas poco estudiados, esta investigación evidencia la necesidad de diseñar metodologías e índices de la fauna acuática. Las turberas son diferentes entre sí, y las familias de macroinvertebrados encontradas son tolerantes a las características fisicoquímicas del agua. Es necesario realizar estudios periódicos que evalúen la calidad del agua y su relación con los macroinvertebrados acuáticos para entender la dinámica de las turberas, generar conocimiento e incrementar su protección.

Palabras clave: bioindicadores; macroinvertebrados; parámetros fisicoquímicos; sustratos artificiales.

INTRODUCCION

Los macroinvertebrados acuáticos son uno de los grupos de organismos más representativos de agua dulce, debido a que presentan una variedad de adaptaciones, incluyendo ciclos de vida complejos (Quesada-Alvarado et al., 2020; Springer, 2010).

Este grupo de organismos son utilizados como bioindicadores para determinar la calidad de los ambientes acuáticos y su estado de conservación, debido a que presentan

diferentes niveles de tolerancia antes los diversos disturbios, por lo que son una herramienta útil para evaluar la condición de los sistemas acuáticos (Roldan-Pérez, 2016). Los bioindicadores son útiles para evaluar características específicas presentes en el agua, para desarrollar esfuerzos de conservación de la biodiversidad acuática, y hacer uso de su función como agentes para el monitoreo de los cuerpos de agua (Gastezzi-Arias et al., 2021; Prat et al., 2009; Roldan, 2003; Roldan-Pérez, 2016; Zhen-Wu, 2010).

Con mayor frecuencia, los estudios que evalúan la calidad y el estado ecológico de los cuerpos de agua se han enfocado en las características fisicoquímicas, y en la biota de los sistemas lóticos, mientras que para los sistemas lénticos los estudios son escasos (Carrasco et al., 2020; Reyes-Morales, 2013; Rivera-Usme et al., 2013). Así mismo, los índices de calidad del agua permiten valorar de manera general, los cuerpos de agua obteniendo una variación espacial y temporal por medio de una fácil interpretación de categorías, siendo útiles para conocer el estado de los diferentes grupos de macroinvertebrados acuáticos (Pérez-Gómez et al., 2021; Roldan, 2003; Roldan-Pérez, 2016; Zhen-Wu, 2010). Además, las variables fisicoquímicas y otros factores abióticos determinan la abundancia, distribución, ciclo de vida y su adaptación en aguas lénticas de los macroinvertebrados (Camacho-Reyes & Camacho-Rozo, 2010; Quesada-Alvarado et al., 2020).

Las turberas de altura son humedales lénticos y semipermanentes, caracterizados por presentar suelos saturados de agua en la época lluviosa, y ricos en materia orgánica. Las características de estos ecosistemas y los factores climáticos favorecen la presencia de una diversidad única debido a las adaptaciones que permite el desarrollo de especies endémicas (Carrasco et al., 2020). Las investigaciones en turberas de altura son escasas; sin embargo, son sitios para el establecimiento de comunidades de organismos acuáticos, con diferente composición taxonómica comparado con otros cuerpos de agua (Carrasco et al., 2020; Springer, 2010). Las investigaciones sobre macroinvertebrados acuáticos en Costa Rica son frecuentes en muchos de los ecosistemas acuáticos, especialmente lóticos. Sin embargo, en las turberas de altura los estudios son escasos y están restringidos principalmente a unos pocos listados e inventarios de organismos

invertebrados en general, como los que se mencionan en Kapelle & Horn (2005). Por lo tanto, se desconocen los aspectos ecológicos de los macroinvertebrados acuáticos que habitan en estos ecosistemas de altura.

La importancia de los índices de calidad de agua (ICA), surgen como un método para evaluar la naturaleza física, química y biológica de las aguas superficiales en relación con su calidad natural, los efectos humanos y sus posibles usos, permitiendo sintetizar y transmitir los resultados de manera simple y clara de los cuerpos de agua de forma espacial y temporal (González et al., 2013; Pérez-Gómez et al., 2021; Torres et al., 2009).

En esta investigación pretende evaluar la composición de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua superficial por medio de los parámetros fisicoquímicos en turberas en Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: Esta investigación se desarrolló en la Cordillera de Talamanca, en el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte, la cual presenta un área continua de bosque de robledales (*Quercus* spp.) y ecosistemas diversos propios de tierras altas, como turberas de altura, bosque montano, entre otros (Bermúdez & Sánchez, 2000; Cleef & Chaverri, 1996; Kapelle & Horn, 2005). Se seleccionaron ocho turberas ubicadas dentro del Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte (09,55478°N & -83,75962°W) (T1, T2, T3, T4, T5 y T6), y en la Reserva Biológica Cerro Vueltas (09,62169°N & -83,85669°W) (T7 y T8), Costa Rica (Fig. 1), con altitudes desde los 2400 a los 3100 msnm. La recolección de la información se realizó en los meses de mayo a noviembre del 2019, que corresponde a la época lluviosa.

Las turberas estudiadas se forman a partir de depósitos de materia orgánica en descomposición, con reducido oxígeno, escasos nutrientes y poca profundidad. Se clasifican como turberas ombrotáficas debido a que su principal aporte de agua es mediante las precipitaciones (Gastezzi-Arias et al., 2021; Sánchez-Murillo et al., 2022). Son de tipo estacional, caracterizados por ambientes heterogéneos y cuerpos de agua poco visibles. En la época lluviosa se forman estanques naturales por el escurrimiento

del agua de lluvia. En algunas de las turberas se forman espejos visibles de agua de diferentes tamaños. Sin embargo, en la época seca, estos estanques se secan, quedando el suelo húmedo debido a la presencia de briófitos, que almacenan agua (Gastezzi-Arias et al., 2021).

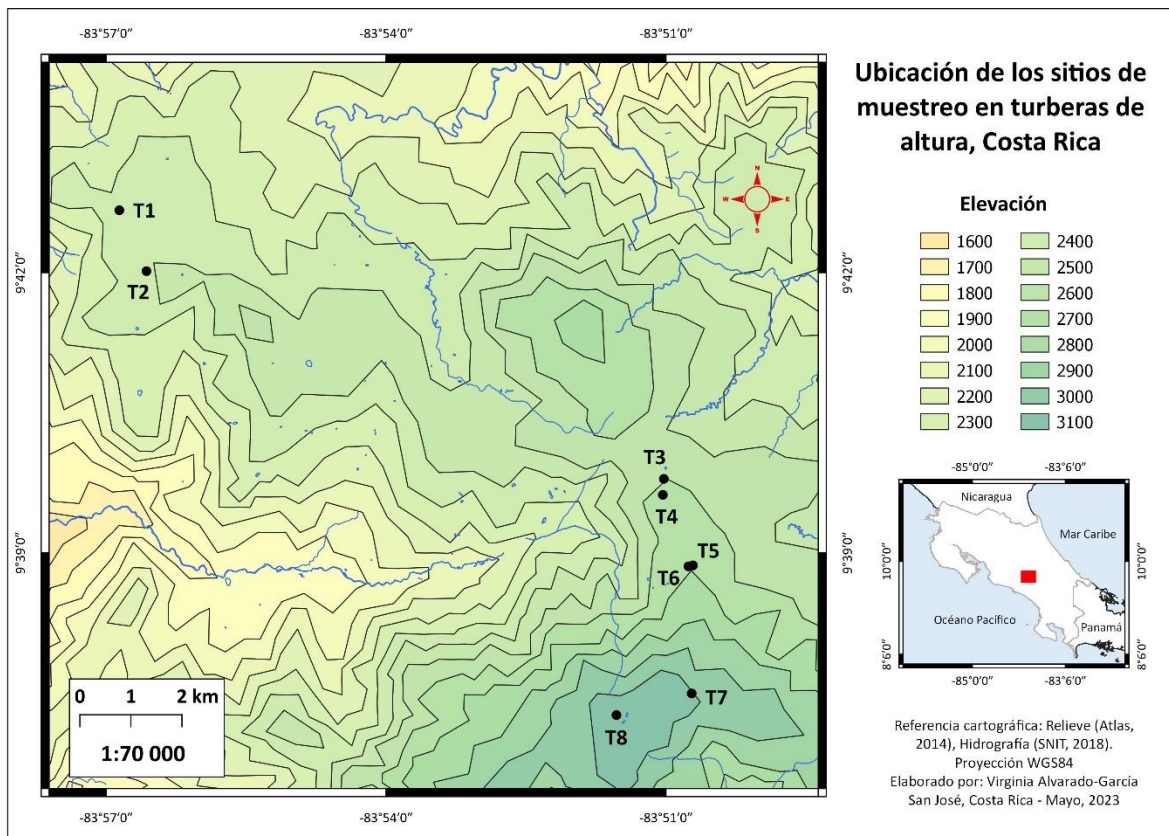


Fig. 1. Ubicación de los sitios de muestreo en las turberas de altura, Cerro de la Muerte, Costa Rica/ **Fig. 1.** Location of the sampling sites in high peatbogs, Cerro de la Muerte, Costa Rica.

Muestreo de macroinvertebrados acuáticos: se utilizaron sustratos artificiales de acuerdo con lo indicado en el Decreto N° 33903-MINAE-S, art. 13, apéndice 2, sobre la metodología de sustratos artificiales para el monitoreo biológico. Es importante mencionar que para este tipo de ecosistema la metodología de sustratos artificiales fue modificada respecto a la original, pues no existen metodologías oficiales diseñadas para estos ecosistemas en el país. La modificación consistió en utilizar sustratos con material propio de cada turbera y no adoquines de concreto como lo indica la metodología de

sustratos artificiales para el monitoreo biológico.

Se confeccionaron diferentes sustratos con malla plástica de empaque de 1 cm de luz. Se rellenaron con material propio de las turberas como (1) hojas secas recolectadas de la vegetación circundante al cuerpo de agua, (2) rocas, (3) trozos de madera y (4) gramíneas secas. Las rocas y los trozos de madera fueron lavadas con agua destilada previamente para quitar las impurezas (Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13; Pérez-Gómez et al., 2021; Quesada-Alvarado & Solano-Ulate, 2020; Ramírez, 2010; Trama et al., 2009). Se prepararon paquetes rellenados individualmente con cada material mencionado, con un peso de 30 g cada uno (Quesada-Alvarado & Solano-Ulate, 2020). En cada sitio se colocaron por duplicado los cuatro tipos de sustrato, de manera independiente atado fijamente a una estaca de madera y sumergidos en el agua en las diferentes profundidades que tuvo cada turbera (Fig. 2).



Fig. 2. Sustratos artificiales y su colocación en turberas de altura, Costa Rica. Fotos: P. Gastezzi-Arias/ **Fig. 2.** Artificial substrate and their placement in high peatbogs, Costa Rica. Photos by: P. Gastezzi-Arias.

Los sustratos sumergidos se dejaron por 30 días de acuerdo con lo mencionado

por Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13; Herranz-Sanz & González del Tánago (1986), y Prat et al., (2009), que es el tiempo en que se obtiene el número más alto de taxones y diversidad. Los sustratos se recolectaron de manera manual, colocando cada sustrato en bolsas plásticas para evitar la pérdida de individuos, se rotularon y luego fueron llevados al laboratorio para limpiar y filtrar el líquido obtenido con un tamiz cilíndrico de 500 μm . Posteriormente, se separaron las muestras para proceder a la búsqueda de macroinvertebrados entre los sustratos con la ayuda de un estereoscopio.

Los especímenes fueron preservados en frascos con alcohol etílico al 70 % y llevados al Laboratorio del Instituto Regional de Estudios de Sustancias Tóxicas (IRET) de la Universidad Nacional para su identificación taxonómica mediante las claves de Pacheco & Rodríguez (2015) y Springer et al. (2010) entre otros. Los especímenes se depositaron en la colección de Entomología Acuática del Museo de Zoología de la Universidad de Costa Rica.

Las mediciones de los parámetros fisicoquímicos se realizaron en siete de los ocho sitios debido a que una de las turberas no presentó un espejo de agua adecuado para la recolección de estos. Las mediciones se tomaron una vez al mes en toda la época lluviosa (mayo a noviembre), en el mes de octubre se colocaron los sustratos artificiales en cada uno de los sitios. En cada sitio de muestreo se midió *in situ*: la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del agua, el pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos totales disueltos (SDT), oxígeno disuelto (OD), turbidez (NTU), potencial de oxígeno disuelto (ORP) y el porcentaje de saturación de oxígeno (PSO), con un multiparámetro portátil Hanna 9828. Las mediciones se hicieron por triplicado en cada sitio de muestreo, para obtener un valor promedio único de cada parámetro obtenido.

Índice de Calidad Biológica del Agua BMWP-CR: Este índice biótico se calcula sumando los puntajes de tolerancia asignados a los grupos o familias de los macroinvertebrados obtenidos en las muestras (Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13; Roldan, 2003). En función de la suma obtenida se establecen seis niveles de calidad para el agua, las dos primeras categorías pertenecen al grupo de aguas no contaminadas (Tabla 1).

Es importante mencionar que a pesar de que el índice BMWP-CR no está diseñado para evaluar la calidad de agua de ecosistemas de altura y con poco flujo de agua como lo son las turberas de altura en Costa Rica, se lo utilizó de manera exploratoria para validar su uso en estos ecosistemas.

Tabla 1

Valores del Índice de Calidad Ecológica del Agua BMWP-CR, según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpo de Aguas Superficiales (Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13)/ **Table 1.** Ecological Water Quality Index Values BMWP-CR, according to the Regulation for the Assessment and Classification of the Quality of Surface Water Bodies (Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13).

Nivel de calidad	BMWP-CR	Color
Aguas de calidad excelente	> 120	Azul
Agua de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101 - 120	Azul
Aguas de calidad regular, eutrófica, contaminación moderada	61 – 100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminadas	36 – 60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16 – 35	Naranja
Aguas de calidad muy mala extremadamente contaminadas	<15	Rojo

Fuente: Decreto N° 33903-MINAE-S, 2007, art. 13.

Índice de Calidad del Agua (ICA-NSF): Para el análisis de la calidad fisicoquímica del agua, se utilizó el índice de la Fundación Nacional de Saneamiento (National Sanitation Foundation) (Oram, 2013), el cual ha sido empleado tanto para medir la calidad del agua, como para determinar los cambios en tramos particulares de ríos a través del tiempo. Así mismo, se ha utilizado para valorar la calidad del agua superficial para consumo humano a nivel mundial, pero se puede adaptar y modificar de acuerdo con las condiciones de cada sistema acuático que se desea estudiar (Cadena & Gómez, 2016; González et al., 2013). El ICA-NSF utiliza nueve variables para clasificar el agua, como: pH, oxígeno disuelto, temperatura, nutrientes, coliformes fecales, sólidos totales, turbidez y DBO. Con los valores obtenidos de las variables que utiliza, el agua se clasifica en: Excelente (90-100), Buena (70-90), Media (50-70), Mala (25-50), Muy Mala (0-25).

Análisis estadístico: con base en los resultados, se calculó la riqueza y la abundancia total y relativa de los macroinvertebrados acuáticos encontrados. Se determinó la diversidad mediante el índice de Shannon-Wiener (Log_2) (H), la dominancia con el índice de Simpson (1-D) y la equitatividad con el índice de Pielou (J) en cada uno de los sitios y sustratos.

Se realizó un análisis de correspondencia (CA) para visualizar las asociaciones de las familias de macroinvertebrados con el tipo de sustrato. El CA se realizó con la función CA del paquete de R “FactoMineR” (Lê et al., 2008).

Se calculó la diversidad beta de la comunidad de macroinvertebrados a nivel familia utilizando el índice de proximidad Bray Curtis, el cual considera la abundancia relativa, y se visualizaron los patrones de diversidad beta ajustando un Escalamiento Multidimensional No Métrico (nMDS; siglas en inglés) con la función metaMDS del paquete de R “vegan”. Para este análisis los datos de las comunidades se utilizan para construir una matriz de proximidades (similitud – disimilitud) entre los individuos (Oksanen et al., 2017).

Además, se realizaron mapas de calor para conocer el patrón de la abundancia de los grupos taxonómicos a nivel de familia en cada tipo de sustrato y sitio de muestreo, así como su presencia/ausencia. Los mapas de calor se realizaron con el paquete de R “ggplot2”. Los mapas calientes son una técnica permite visualizar de manera sencilla cuál o cuáles son los grupos taxonómicos más abundantes (Wickham, 2016).

Para el procesamiento de los datos de los parámetros fisicoquímicos del agua, se realizaron pruebas de Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) para los datos paramétricos y Kruskal-Wallis para los datos no paramétricos, con el fin de determinar las diferencias entre los sitios de muestreo y meses. En aquellos casos donde se detectaron diferencias significativas se realizaron pruebas de comparación múltiple (prueba de Tukey para datos paramétricos y prueba múltiple de Dunn para datos no paramétricos). Previo a la realización de las pruebas estadísticas, se analizó la normalidad y homogeneidad de varianza de cada parámetro fisicoquímico. En aquellos casos donde no se cumplió alguno de los criterios anteriores se realizaron pruebas no paramétricas.

RESULTADOS

En los 32 sustratos artificiales colocados se recolectó un total de 739 individuos, representados en 10 familias, siete géneros identificados y cinco indeterminados (Tabla 2). Las familias más representativas y con mayor abundancia fueron Chironomidae (Insecta: Diptera) con 411 individuos, 160 para la familia Hyalellidae (Amphipoda: Hyallellidae), y 61 individuos para Limnephilidae (Insecta: Trichoptera). La mayor abundancia de individuos estuvo en las T3 y T5 (164 y 208 respectivamente).

Tabla 2

Composición taxonómica y presencia de macroinvertebrados acuáticos en sustratos artificiales en turberas de altura, Costa Rica./ **Table 2.** Taxonomic composition and presence of aquatic macroinvertebrates in artificial substrates in high peatbogs. Costa Rica.

Familia	Género	Sitios de estudio								Presencia en sustratos			
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	hierbas	hojas	madera	roca
Scirtidae	Gen. Indet	26	6	0	0	4	0	0	0	x	x	x	x
Limnephilidae	<i>Limnephilus</i>	2	0	1	4	1	19	22	12	x	x	x	x
Chironomidae	Gen. Indet	37	122	7	5	197	3	36	4	x	x	x	-
Gyrinidae	<i>Gyrinus</i>	1	0	0	1	0	0	0	0	x	x	x	-
Hyalellidae	<i>Hyalella</i>	0	0	156	3	1	0	0	0	x	x	x	-
Aeshnidae	<i>Anax</i>	0	0	0	0	1	0	1	1	x	-	-	-
Libellulidae	<i>Sympetrum</i>	0	0	0	0	4	1	2	0	-	x	x	x
Hydrophilidae	Gen. Indet	0	1	0	0	0	0	0	0	-	x	-	-
Dytiscidae	Gen. Indet	1	0	0	0	0	0	14	0	x	-	x	x
	<i>Rhantus</i>	0	0	0	0	0	0	3	1	-	x	x	-
	<i>Liodessus</i>	0	1	0	0	0	0	33	2	x	x	-	-
Acari	Gen. Indet	0	0	0	3	0	0	0	0	x	x	-	-

La mayor diversidad de taxones se registró en el sitio T7 ($H' = 1.52$), mientras que la mayor dominancia se halló en el sitio T4 ($D = 0.76$) con respecto a los otros sitios (Fig. 3 A y B).

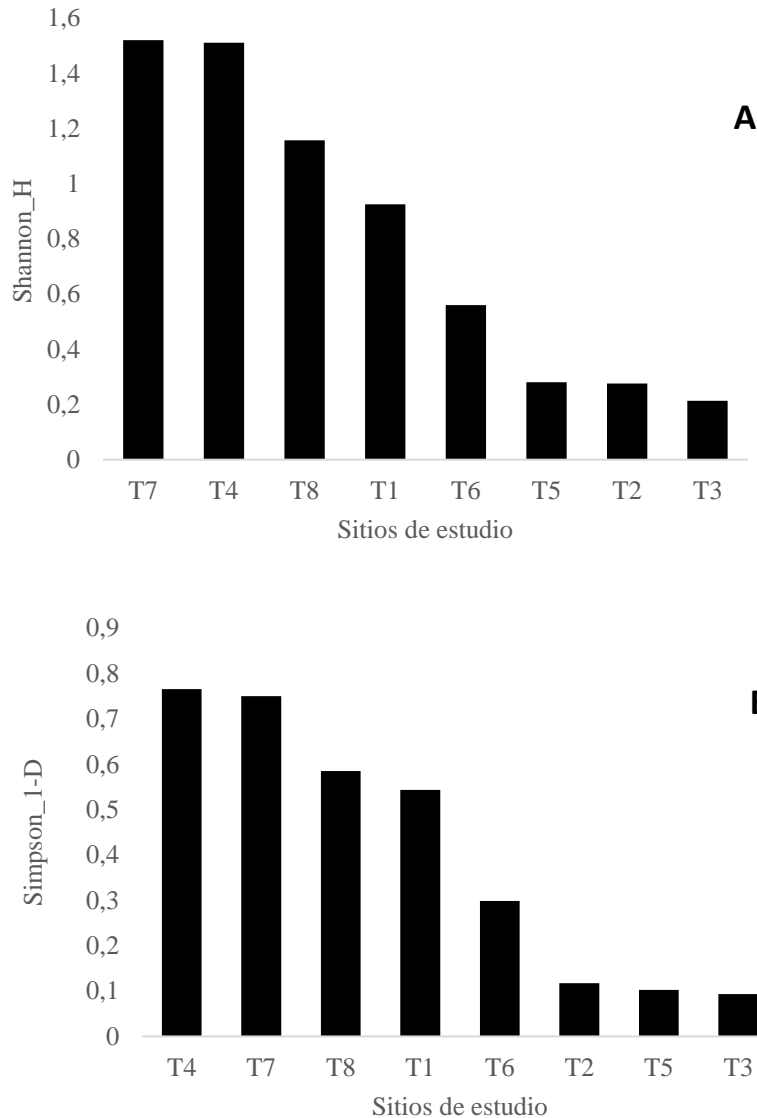


Fig. 3. Diversidad (A) y dominancia (B) de macroinvertebrados acuáticos presente en los diferentes sitios de muestreo en las turberas de altura, Costa Rica./**Fig. 3.** Diversity (A) and dominance (B) of aquatic macroinvertebrates present in the different sampling sites in the high peatbogs, Costa Rica.

Se observó una alta similitud de familias en tres de los cuatro sustratos, siendo las rocas el sustrato más diferente en representatividad de familias de macroinvertebrados (solo un 40 % del total de familias se observó en rocas). Las familias Chironomidae y

Hyaellidae fueron las más abundantes en hierbas, hojas y madera, mientras que las familias Dytiscidae y Limnephilidae fueron las más representativas en rocas (Fig. 4).

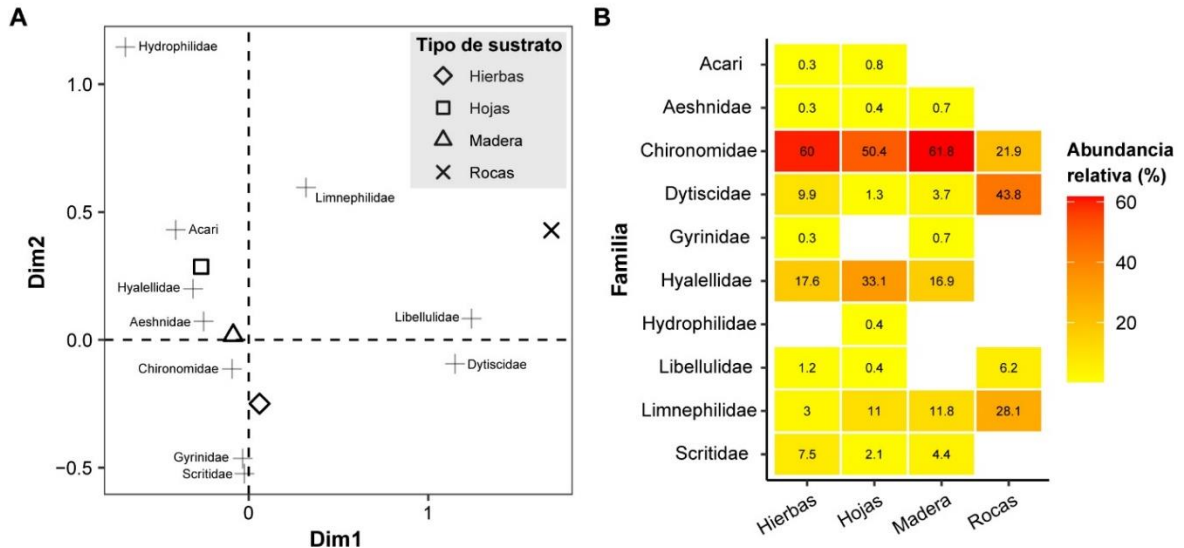


Fig. 4. A) Análisis de correspondencia de asociaciones de las familias de macroinvertebrados con el tipo de sustrato. B) Mapa de calor con las abundancias de macroinvertebrados a nivel de familia en cada tipo de sustrato en las turberas de altura, Costa Rica./**Fig. 4.** A) Correspondence analysis of macroinvertebrate family associations with substrate type. B) Heat map with macroinvertebrate abundances at family level in each type of substrate in the high peatbogs, Costa Rica.

En cuanto a la similitud en la composición de macroinvertebrados acuáticos, se observó que los sitios T1, T2, y T5 guardan una relación en cuanto a la riqueza y abundancia de familias (Fig. 5A). Estos sitios se caracterizan por registrar la presencia de individuos de las familias Chironomidae y Scirtidae, así como altas abundancias de ellas (Fig. 5B). Asimismo, los sitios T6 y T8 presentaron una alta similitud en el ensamble, teniendo individuos de la familia Limnephilidae con altas abundancias en ambos sitios (Fig. 5B). El sitio T3 fue el más diferente con respecto a los demás sitios, donde solo presentó tres familias y la familia Hyaellidae fue la más representativa (<90 %) (Fig. 5B).

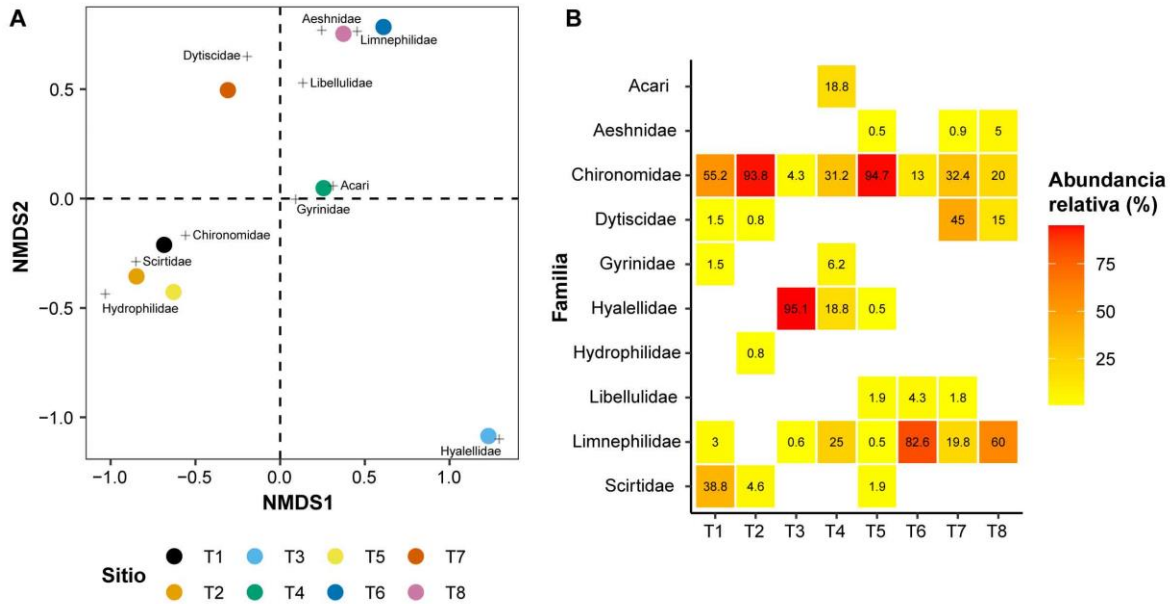


Fig. 5. A) Análisis nMDS, para el ordenamiento de la riqueza y abundancia de familias de macroinvertebrados acuáticos en ocho sitios de muestreo. B) Mapa de calor con las abundancias de macroinvertebrados a nivel de familia en las turberas de altura, Costa Rica.

Fig 5. A) nMDS analysis for the ordination of the richness and abundance of aquatic macroinvertebrate families in eight sampling sites. B) Heat map with macroinvertebrate abundances at the family level in the high peatbogs, Costa Rica.

Con respecto a los parámetros fisicoquímicos del agua, se obtuvo valores promedios bajos en el oxígeno disuelto (< 1.74 mg/L), sólidos totales (< 5.61 mg/L) y porcentaje de saturación de oxígeno (< 23.98 %), y valores altos en la temperatura del agua (16.62 °C) y la conductividad (< 26.76 µS/cm) (Tabla 3). Por otro lado, se encontraron diferencias estadísticas al comparar entre los sitios de muestreo para pH (Anova; $F = 3.97$; $p = 0.003$), temperatura (Kruskal-Wallis; $X^2 = 18.49$; $p = 0.005$), sólidos totales (Kruskal-Wallis; $X^2 = 26.44$; $p < 0.001$) y conductividad (Kruskal-Wallis; $X^2 = 25.50$; $p < 0.001$) (Tabla 3), mientras que fue similar para oxígeno disuelto (Kruskal-Wallis; $X^2 = 1.76$; $p = 0.93$), sólidos disueltos (Kruskal-Wallis; $X^2 = 2.28$; $p = 0.89$), ORP (Anova; $F = 0.47$; $p = 0.82$), nitratos (Kruskal-Wallis; $X^2 = 4.05$; $p = 0.67$) y turbidez (Kruskal-Wallis; $X^2 = 1.46$; $p = 0.96$).

Con respecto a la aplicación del Índice de Calidad del Agua (ICA-NSF), en la Tabla 3, se presenta el puntaje obtenido de acuerdo con la escala de clasificación del índice, el agua de las turberas de altura es categorizada como calidad media.

Tabla 3

Promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua en los meses de muestreo, y descripción del puntaje en la aplicación del índice de calidad de agua (ICA-NSF) en las turberas de altura, Costa Rica./ **Table 3.** Average of water physicochemical parameters in the sampling months, and description of the score in the application of the water quality index (ICA-NSF) in the high peatbogs, Costa Rica.

Sitios	% de SOD	pH	T (°C)	ST	O2 disuelto (mg/L)	µS/cm	Nitratos (Unidad)	Turbidez	ORP	ICA-NSF	Descripción del puntaje
T1	27.48 ^a	4.98 ^{ab}	16.01 ^a	13.48 ^a	2.03 ^a	26.76 ^a	0.78 ^a	1.42 ^a	313.61 ^a	58	media
T2	23.98 ^a	4.87 ^{ab}	12.80 ^b	5.61 ^a	1.74 ^a	12.05 ^b	0.67 ^a	3.41 ^a	308.76 ^a	53	media
T3	26.76 ^a	4.86 ^{ab}	13.23 ^a _{bc}	8.62 ^a	2.08 ^a	17.24 ^{ab}	0.53 ^a	2.56 ^a	324.29 ^a	56	media
T4	29.53 ^a	4.37 ^a	12.17 ^b	11.67 ^a	2.27 ^a	23.29 ^{ac}	0.47 ^a	3.30 ^a	356.43 ^a	51	media
T5	32.98 ^a	4.90 ^{ab}	16.62 ^a _c	8.43 ^a	2.36 ^a	16.71 ^{ab}	0.67 ^a	2.68 ^a	303.72 ^a	58	media
T6	32.41 ^a	4.87 ^{ab}	14.19 ^a _{bc}	5.76 ^a	2.34 ^a	11.24 ^{ab}	0.76 ^a	3.73 ^a	310.82 ^a	57	media
T7	32.14 ^a	5.23 ^b	14.60 ^a _{bc}	3.81 ^a	2.28 ^a	7.57 ^{bd}	0.74 ^a	2.35 ^a	335.22 ^a	59	media

Por otra parte, la aplicación del Índice BMWP-CR para cada una de las turberas muestreadas mostró que, en la T7 ubicada a 3100 m.s.n.m, el puntaje obtenido (62) indica aguas de calidad regular; mientras que en T4, T5 y T8 localizadas a 2600, 2800 y 3100 metros de altitud, la categoría obtenida corresponde a calidad mala (puntajes: 37, 45 y 56 respectivamente); sin embargo, para las T2, T3 y T6, ubicadas a 2400, 2600 y 2800 m.s.n.m, del BMWP-CR indicó calidad crítica (puntajes: 17, 29 y 26 respectivamente).

El análisis de componentes principales (ACP) indicó que la relación entre las variables fisicoquímicas del agua y los sitios de muestreo puede ser explicada a través

de sus dos primeros componentes, en un 65.11 % de variabilidad, mostrando a T4 alejada del resto de los sitios de muestreo, evidenciando la poca relación entre los otros sitios de muestreo, así como en su abundancia de individuos presentes (n=16) (Fig. 6).

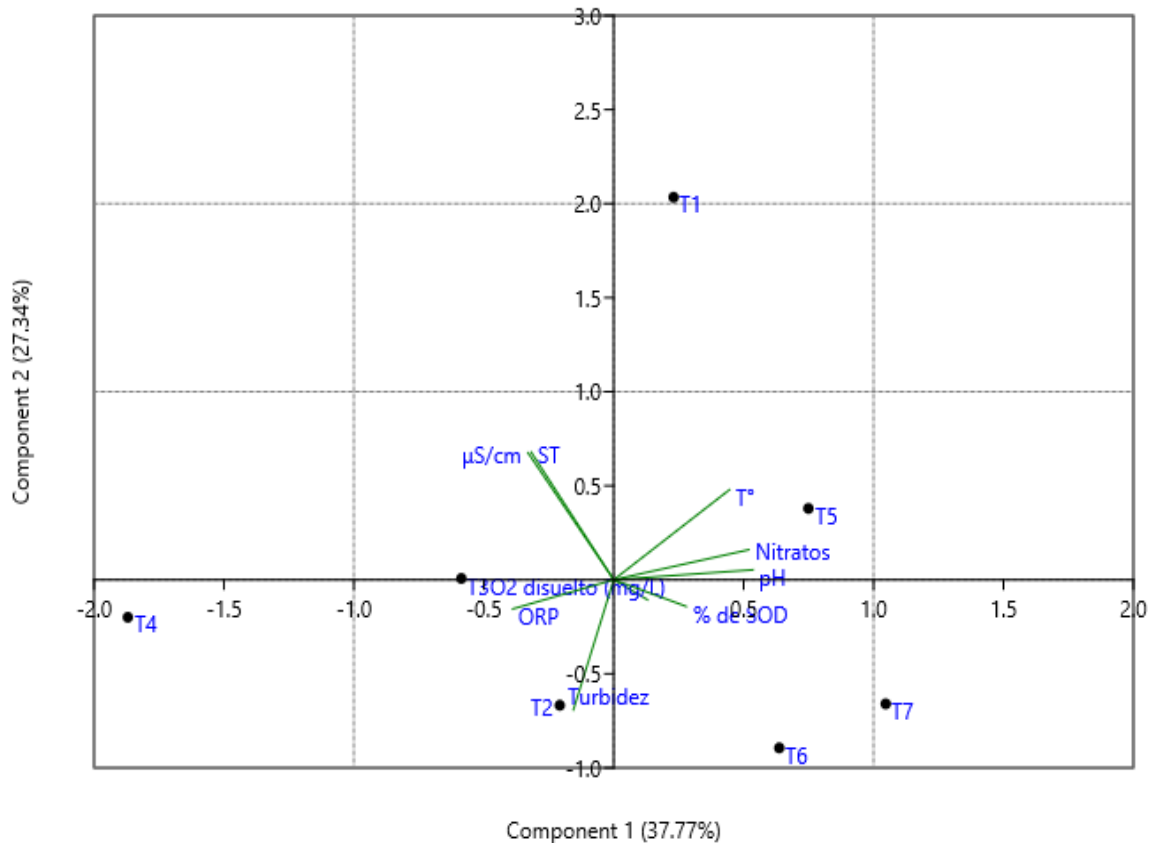


Fig 6. Análisis de componentes principales de las variables fisicoquímicas del agua y los sitios de muestreo en las turberas de altura, Costa Rica./ **Fig. 6.** Principal component analysis of water physicochemical variables and sampling sites in high peatbogs, Costa Rica.

En el primer componente, el pH, el oxígeno disuelto (OD), la temperatura (T°), el porcentaje de saturación de oxígeno (%SOD) y los nitratos, presentan mayores contribuciones en la varianza en un 37.77 %. Estos parámetros podrían relacionarse con el establecimiento, y presencia de las familias de macroinvertebrados halladas en los sitios de muestreo, por ser factores indispensables para permitir la vida en el agua y porque, además, condicionan su calidad. En el segundo componente, las variables como la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y sólidos totales disueltos (ST) tuvieron valores con menor aporte en la varianza en un 27.34 %.

DISCUSIÓN

Las turberas de altura en Costa Rica son sistemas lénticos que se caracterizan por ser sitios de poca profundidad, semipermanentes y con niveles bajos de oxígeno, lo que esto podría atribuirse a la baja diversidad de familias y especies halladas. Según los resultados, las familias más representativas fueron Chironomidae y Hyalellidae, lo que concuerda con lo reportado por Hahn-vonHessberg et al., (2009), Posada-García et al., (2008) y Reyes-Morales (2013), que la presencia y abundancia de estas dos familias se debe a su tolerancia a aguas con niveles bajos de oxígeno, similares a las turberas en estudio.

Por otro lado, el uso de sustratos artificiales como método de recolecta, fue valioso debido a que las turberas estudiadas poseen poca profundidad, escaso flujo de agua y fondos fangosos, lo que permitió su utilización. En tres de los cuatro tipos de sustratos colocados, se evidenció una alta colonización de familias de macroinvertebrados, especialmente representados con mayor abundancia las familias Chironomidae y Hyalellidae en sustratos de hierbas, hojas y madera (Fig. 4).

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los sustratos pueden ser muy selectivos para el establecimiento de taxones y representar baja densidad y diversidad en la recolecta, ya que atraen más organismos bentónicos (Quesada-Alvarado & Solano-Ulate, 2020). Además, se resalta la importancia que posee esta investigación, como propuesta para el uso de sustratos artificiales, para estos casos, donde la información metodológica y biológica, es escasa. Por otra parte, Hernández et al., (1998) justifican su uso como método de recolecta, dado a que se ha demostrado su utilidad en aquellas zonas con problemas de contaminación, sitios profundos o cuando existen fondos fangosos y poco estables, esto último concuerda con las características de las turberas estudiadas.

Varios autores como Hernández et al., (1998), Pérez-Gómez et al., (2021), Padilla et al., (2021) y Quesada-Alvarado & Solano-Ulate. (2020), reportan que los sustratos artificiales son colonizados por una variedad de familias y géneros de macroinvertebrados, sin embargo, la familia más abundante que coloniza es Chironomidae. Además, estos autores indican que los macroinvertebrados tienen la

capacidad de colonizar rápidamente un sustrato, pero puede variar de acuerdo con las especies que habiten en un cuerpo de agua. Esto podría ser el motivo por el cual Chironomidae en este estudio obtuvo mayor abundancia y su presencia estuvo representada en todos los sitios estudiados.

Por otra parte, Chironomidae es considerada una de las familias de macroinvertebrados más abundantes en los ecosistemas acuáticos, pueden dominar áreas con amplios gradientes ambientales, en ocasiones son los únicos representantes que colonizan ambientes contaminados, y algunos representantes de esta familia se caracterizan por tener la capacidad de establecerse en una variedad de hábitats (Oviedo & Reinoso, 2018; Pérez-Gómez et al., 2021; Quesada-Alvarado & Solano-Ulate, 2020 y Sierpe & Sunico, 2019). Esta familia juega un papel esencial en las redes tróficas y colonización de los cuerpos de agua. Son especialistas en consumir materia orgánica particulada, algas, hojas, madera y otros insectos acuáticos (Sierpe & Sunico, 2019). Algunos géneros de esta familia son considerados indicadores de condiciones ambientales particulares (Hernández et al., 1998).

La similitud en la riqueza y abundancia en la composición de macroinvertebrados encontrados en los sitios de estudio, podría estar relacionada a la poca profundidad y flujo de agua de las turberas, y a la vegetación asociada que produce sustratos que pueden ser altamente colonizados, a diferencia de otro tipo de sustratos como rocas y arena. Posada-García et al., (2008) y Hahn-vonHessberg et al., (2009), mencionan que en los cuerpos de agua lenticos existe poca variación de sustratos siendo mayormente de hoja y madera, lo que favorece una alta permanencia tanto espacial como temporal de los taxones en estos ecosistemas, situación similar encontrada en este trabajo.

En todas las turberas, las características fisicoquímicas del agua fueron variables. Se registraron valores promedios en los meses de muestreo, como: pH del agua bajo (mínimo 4.30 y máximo 5.23); la temperatura del agua (mínima 12.10 y máximo 16,62 °C); el porcentaje de oxígeno disuelto en agua (mínimo 1.74 y máximo 2.36); los sólidos totales (mínima 3.81 y máximo 13.48) y la conductividad (mínima 7.57 y máximo 26.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Tabla 3). Estas variaciones podrían obedecer a lo esperado para turberas de altura *per se*. Sin embargo, la falta de estudios de las características fisicoquímica del

agua en este tipo de ecosistema, no permiten comparar estos resultados. Sin embargo, Carrasco et al., (2020); Molina et al., (2008); Moya et al., (2009); Oyague & Maldonado (2015); Rivera-Usme et al., (2013), encontraron en ecosistemas altoandinos de Perú y Bolivia que los valores fisicoquímicos del agua de bofedales son altamente variables, debido a factores ambientales como menor presión atmosférica por la altitud, aporte pluvial, la naturaleza geológica, la composición química del agua, entre otros, lo que ocurre de manera similar en las turberas.

En relación con lo anterior, Sánchez-Murillo et al., (2022), estudiaron la composición química del agua, y determinaron que las turberas de altura de Costa Rica contienen altas concentraciones de materia orgánica en suelo y agua, altos niveles de carbono orgánico disuelto, lentas tasas de meteorización de la roca, y bajos efectos de la acción antropogénica local. Lo que permite entender que las turberas poseen las condiciones fisicoquímicas y ecológicas adecuadas del agua, que podrían favorecer el establecimiento de los diferentes taxones, además lo que explicaría una mayor presencia de familias de macroinvertebrados especialistas en consumir materia orgánica particulada.

Por otra parte, el oxígeno y el pH son los parámetros que condicionan la calidad del agua. En este trabajo se obtuvieron valores bajos en ambos parámetros, sin embargo, estos son considerados como medidas aceptables para turberas de altura. Varios autores como Molina et al., (2008), Mosquera-Restrepo & Peña-Salamanca, (2019) y Moya et al., (2009), reportaron para bofedales y turberas altoandinas, y ríos de alta montaña, valores bajos en el oxígeno y pH debido a la acumulación y descomposición de materia orgánica, y al proceso de oxidación orgánica. Esto coincide con los resultados de este trabajo y que además estas condiciones de bajo oxígeno y pH encontradas podrían estar relacionadas con la poca abundancia y diversidad de familias de macroinvertebrados.

Los resultados de ICA-NSF mostraron que el agua de las turberas se categoriza como agua de calidad media con respecto a los bajos niveles de oxígeno, pero esto podría reflejar las condiciones normales de estos ambientes de alta montaña (Molina et al., 2008). Por lo tanto, sería mejor establecer una escala propia de las turberas (para los

parámetros fisicoquímicos) que puedan proporcionar una medición más acertada para estos ambientes.

Es importante mencionar que variables como coliformes fecales (de forma cuantitativa), DBO y fosfatos, no fueron incluidas en el cálculo del ICA-NSF. Sin embargo, a manera de referencia y comprobación de la existencia de coliformes fecales, se tomó para su análisis una muestra puntual de agua en una turbera, comprobándose que no existe contaminación de este tipo, aunque se debe incrementar el muestreo de coliformes para su verificación en el tiempo. Se sugiere que en trabajos posteriores se incluyan las variables faltantes como el DBO, DBQ, fosfatos, y otros. Por otro lado, se debe considerar que la aplicación del índice ICA-NSF para la calidad del agua en turberas de altura es relativamente nuevo, y se necesitan algunas modificaciones para su uso y aplicación.

Los resultados de la aplicación del índice BMWP-CR, no son concluyentes para este estudio, debido a que este índice no está diseñado para turberas de altura, ni contempla su monitoreo, por lo que los resultados obtenidos se pueden utilizar como referencia para justificar la necesidad de realizar una adaptación del índice a estos ambientes. En este estudio el índice BMWP-CR mostró categorías entre calidad regular, mala y crítica, a pesar de tratarse de ambientes conservados sin fuentes de contaminación antropogénica. Esto pudo deberse a: i) la naturaleza de este ecosistema, ii) su composición fisicoquímica del agua, iii) la ausencia de ciertos taxones que usualmente evidencian una calidad buena del agua, pero que no se establecen en este tipo de ecosistema léntico con poco oxígeno, pH ácidos, temperaturas bajas del agua, y iv) a los sustratos utilizados como método de recolecta que se enfocan en la fauna bentónica y no incluyen taxones que viven en la columna de agua.

Por lo tanto, en este trabajo se evidencia que, aunque el índice BMWP-CR no es para este tipo de ecosistemas y no se debe usar, surge la necesidad de crear índices de calidad del hábitat o del estado de conservación del ecosistema, que sea más integral y que tome en cuenta los rasgos funcionales más que los niveles de tolerancia de los cuerpos de agua, debido a la naturaleza estructural de las turberas de altura (M. Springer, comunicación personal, 26 de agosto del 2022). Por lo que es de gran importancia diseñar metodologías e índices más robustos y adecuados para estos ecosistemas

lenticos e intensificar los muestreos donde se utilicen una combinación de métodos de captura para comprobar la presencia de otros taxones que determinen la calidad del agua.

Por otra parte, es importante destacar que las investigaciones sobre la calidad del agua en turberas de altura son escasas, lo que limita realizar una comparación con sitios similares en el país. Sin embargo, es necesario recalcar que esta investigación es un esfuerzo exploratorio del cual se parte para visualizar las necesidades de diseñar metodologías e índices que evalúen la fauna acuática de las turberas de altura en Costa Rica. Finalmente, es necesario realizar estudios periódicos a una escala temporal de evaluación de la calidad del agua y su relación con la fauna de macroinvertebrados acuáticos para conocer su relación con el ecosistema y la dinámica de las turberas de altura. Esta información pueda servir de base para entender el estado ecológico de las turberas, debido a estos ecosistemas difieren de los conocidos en otros ambientes estudiados y se encuentran especialmente vulnerables ante los efectos de la variabilidad climática.

Declaración ética: los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho contribuciones significativas; que no hay conflicto de intereses de ningún tipo; y que hemos seguido todos los procedimientos y requisitos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiación se declaran completa y claramente en la sección de agradecimientos.

Agradecimientos: Nuestro especial agradecimiento a Monika Springer por su ayuda en la revisión y sus valiosos aportes al manuscrito, a Ricardo Sánchez Murillo del Grupo de Investigación de Isótopos Estables y Laboratorio de Manejo de Recursos Hídricos, Escuela de Química de la UNA-Costa Rica, Francisco Quesada Alvarado del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la UNA-Costa Rica, al Programa de Laboratorios de la Universidad Estatal a Distancia (ProLab), y al Parque Nacional Los Quetzales-SINAC. Además, se agradece a Virginia Alvarado García por la

ayuda en la elaboración del mapa. Así mismo a Yarenis Chavarría y Daniel Martínez Araya por su colaboración en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Bermúdez, M., & Sánchez, J. (Eds.). (2000). *Identificación de vacíos de información Botánica en Centroamérica*. Ediciones WWF -Centroamérica. <https://bit.ly/3ozbvQc>
- Cadena, J.J., & Gómez-Torrado, R.D. (2016). Evaluación de la calidad del agua del río Tejo (Ocaña, Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos. *Ingenio*, 9(1), 121–132. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2070>
- Camacho-Reyes, J. A., & Camacho-Rozo, C. P. (2010). Aspectos sobre la historia natural de macroinvertebrados en esteros semipermanentes de la altillanura en el departamento de Casanare. *Orinoquia*, 14(S2), 71–82 <https://doi.org/10.22579/20112629.92>
- Carrasco, C., Rayme, C., Alarcón, R.P., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H. (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú. *Revista Biología Tropical*, 68(S2), S116-S131.
- Cleef, A., & Chaverri, A. (1996). Turberas de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. En: Ficha Técnica Turberas de Talamanca. Programa Nacional de Humedales SINAC-MINAE.
- Gastezzi-Arias, P., Martínez Araya, D., & Jones Román, G. (2021). Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 13(2), e3716. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i2.3716>
- González, V., Caicedo, O & Aguirre, N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada La Ayurá, Antioquia, Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 16(1), 97-107. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/33863/40485>
- Hahn-von Hessberg, C., Toro, D., Grajales-Quintero, A., Duque-Quintero, G. & Serna-Uribe, L. (2009). Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos, en la estación piscícola. *Boletín Científico Museo*

Historia Natural, 13(2), 89-105. Recuperado de:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30682009000200007&script=sci_abstract&tlng=pt

Hernández Villar, R., J. Rueda Sevilla., G. Tapia & Martínez-López, F. (1998). Efectividad de los sustratos artificiales para el muestreo de macroinvertebrados en ríos. *Ecología*, 12(1), 151-166. Recuperado de: https://www.miteco.gob.es/en/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_12_09_tcm38-100612.pdf

Herranz Sanz J. M. & González del Tánago, M. (1986). La colonización de los sustratos artificiales por macroinvertebrados bénticos en las aguas del alto Tajo: Comparación de métodos de muestreo. *Limnetica* 2(1), 163-171. Recuperado de: <http://www.limnetica.net/documentos/limnetica/limnetica-2-1-p-163.pdf>

Kapelle, M. & Horn, S. P. (2005). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

Molina, C.I, Gibon, FM, Pinto, J., & Rosales, C. (2008). Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 106-116. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.365>

Mosquera-Restrepo, D., & Peña-Salamanca, E.J. (2019). “Ensamblaje” de macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables fisicoquímicas en un río de montaña en Colombia. *Revista Biología Tropical* 67(6), 1235-1246. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i6.30842>

Moya, N., Gibon FM., Oberdorff, T., Rosales, C., & Domínguez, E. (2009). Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano: Implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecología Aplicada*, 8(2), 105-114. <https://doi.org/10.22458/urj.v8i1.1225>

Oksanen, F.J. (2017). Vegan: Community Ecology Package. R package Version 2.4-3. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>

- Oram, B. (2013). Monitoring the Quality of Surface Waters (WQI Calculator). Recuperado de: <https://water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>
- Oviedo-Machado, N., & Reinoso-Flores, G. (2018). Aspectos ecológicos de larvas de Chironomidae (Diptera) del río Opia (Tolima, Colombia). *Colombiana de Entomología*, 44(1):101-109. <https://doi:10.25100/socolen.v44i1.6546>.
- Oyague Passuni, E. & Maldonado Fonkén, M.S. (2015). Relationships between aquatic invertebrates, water quality and vegetation in an Andean peatland system. *Mires and Peat* 15: Art. 14. Recuperado de: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map15/map1514.php>
- Pacheco, B., & Rodríguez, L.M. (2015). Macroinvertebrados de la cuenca del Río Reventazón y uso para determinar la calidad biológica del agua. Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica. 142p.
- Padilla García, C. A., Tamaris Turizo, C. E., & Sierra Labastidas, T. K. (2021). Colonización por macroinvertebrados acuáticos en dos sustratos en un río de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Caldasia*, 44(3). <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n3.94127>
- Pérez Gómez, G., Alvarado García, V., Rodríguez Rodríguez, J.A., Herrera, F., & Sánchez Gutiérrez, R. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua superficial en el río Grande de Tárcoles, Costa Rica: un enfoque ecológico. *UNED Research Journal*, 13(1), e3148. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3148>
- Posada-García, J.A., G. Abril-Ramírez & Parra-Sánchez, L. N. (2008). Diversidad de los macroinvertebrados acuáticos del Páramo de Frontino (Antioquia, Colombia). *Caldasia*, 30(2), 441–455. <http://www.istor.org/stable/23641903>
- Poder Ejecutivo. (2007, 17 de setiembre). Decreto Ejecutivo N°33903-MINAE-S. *Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*. Diario Oficial La Gaceta 178. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/cos74387.pdf>
- Prat, N., B. Ríos., R. Acosta & Rieradevall, M. (2009). Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas. En E. Domínguez, & H.R. Fernández (Eds.).

- Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y Biología* (pp. 631-654). Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.
- Quesada-Alvarado, F., & Solano-Ulate, D. (2020). Colonización de macroinvertebrados acuáticos en tres tipos de sustratos artificiales, en un río tropical. *Revista de Biología Tropical*, 68(Suplemento 2), S68-S78. <http://doi.org/10.15517/RBT.V68IS2.44339>
- Quesada-Alvarado, F., Umaña Villalobos, G., Springer, M., & Picado Barboza, J. (2020). Variación estacional y características fisicoquímicas e hidrológicas que influyen en los macroinvertebrados acuáticos, en un río tropical. *Revista de Biología Tropical*, 68(Suplemento 2), S54-S67. <https://doi.org/10.15517/RBT.V68IS2.44332>
- Ramírez, A. (2010). Métodos de Recolecta. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 41-50.
- Reyes-Morales, F. (2013). Macroinvertebrados acuáticos de los cuerpos lénticos de la Región Maya, Guatemala. *Científica*, 23(1) 7-16. <https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v23i1.107>
- Rivera-Usme, J. J., Pinilla-Agudelo, G. A., & Rangel-Churio, J. O. (2013). Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables físicas y químicas en el humedal de Jaboque-Colombia. *Caldasia*, 35(2), 389–408. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/41209>
- Roldan, G. (2003). La Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP-Col. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 170p.
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 40(155), 254-274. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Sánchez-Murillo, R., Gastezzi-Arias, P., Sánchez-Gutiérrez, R., Esquivel-Hernández, G., Pérez-Salazar, R., & Poca, M. (2022). Exploring Dissolved Organic Carbon Variations in a High Elevation Tropical Peatland Ecosystem: Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Frontiers in Water* 3(742780). <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.742780>

- Sierpe, C., & Sunico, A. (2019). Familia Chironomidae (Orden Díptera) utilizada como bioindicador para la determinación de calidad ambiental de la cuenca del Río Gallegos (Santa Cruz, Argentina). *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 11(2), 92–105. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v11i2.789>.
- Springer, M. (2010). Trichoptera. En Springer, M., Ramírez, A. & Hanson, P. (Eds). Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 63-93.
- Torres, P., Cruz, C. H & Patiño, P.J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15s1/v8n15s1a09.pdf>
- Trama, F. A., Rizo Patrón V, F. L., & Springer, M. (2009). Macroinvertebrados bentónicos del humedal de Palo Verde, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 57(1), 275-284.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4. <https://ggplot2.tidyverse.org/>
- Zhen-Wu, POR (2010). Índices de calidad del agua en la cuenca del arroyo Victoria, Guanacaste, Costa Rica (2007-2008). *UNED Research Journal*, 2(1), 45-61. <https://doi.org/10.22458/urj.v2i1.221>

6. Artículo 3

Las turberas de altura del Parque Nacional Tapantí en Costa Rica: caracterización e importancia del suelo turboso

Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V & Pérez-Quezada, J. (2023). Las turberas de altura del Parque Nacional Tapantí en Costa Rica: caracterización e importancia del suelo turboso. *Revista Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1758. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1758>

Las turberas de altura del Parque Nacional Tapantí en Costa Rica: caracterización e importancia del suelo turboso

The high peatbogs of Tapantí National Park in Costa Rica: characterization and importance of the peaty soil

Paola Gastezzi-Arias^{1,2†} (<https://orcid.org/0000-0002-0663-7446>), Virginia Alvarado-García² (<https://orcid.org/0000-0001-7430-0549>) y Jorge Pérez-Quezada³ (<https://orcid.org/0000-0002-0449-7654>)

¹ Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Costa Rica (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

² Laboratorio de Vida Silvestre y Salud, Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

³ Laboratorio de Ecología de Ecosistemas del Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Renovables, Universidad de Chile, Avenida Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile.

† Autor de correspondencia (pgastezzi@uned.ac.cr)

RESUMEN. En las tierras altas de Costa Rica existen formaciones ecológicas que han sido poco estudiadas como el páramo y las turberas. Las turberas en Costa Rica se ubican mayormente en el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte en la Cordillera de Talamanca. El objetivo de esta investigación fue caracterizar la vegetación y el suelo de las turberas de altura con el fin de aportar información científica sobre estos ecosistemas para futuras investigaciones. Se tomaron muestras de suelo en cuatro turberas (T1, T2, T3 y T4) a diferentes profundidades (20, 30 y 60 cm), en un gradiente que van desde los 2400 a 3100 m.s.n.m. Se realizaron análisis físicos y químicos del suelo en el laboratorio del CIA-UCR y se describió la vegetación de las turberas. Los suelos en las turberas corresponden al orden Histosol con una textura franco-arenosa, que predominan en zonas frías y pantanosas. El porcentaje de carbono y materia orgánica fue alto en la T3 con 32.90 % y 47.05 % respectivamente, mientras que la relación C/N fue mayor en T1 con una relación de 22.30 %. Los sitios con mayor similitud fueron T2 y T4 en un 99 %. La caracterización de la vegetación estuvo representada por plantas vasculares, briófitos en especial del género *Sphagnum* y líquenes que contribuyen a la formación del suelo turboso. Las turberas son eficientes en acumular carbono en el suelo debido a la materia orgánica que se acumula. La falta de estudios dificulta la comparación de los resultados de este estudio.

Se espera que esta investigación sea un aporte valioso para la ciencia, y para consolidar la conservación de la poca extensión de turberas de altura con las que cuenta el país.

Palabras clave: carbono, humedales de altura, materia orgánica, suelo.

SUMMARY

In the highlands of Costa Rica, there are ecological formations that have been poorly studied such as the paramo and peatbogs. Peatbogs in Costa Rica are located in the Tapantí-Macizo de la Muerte National Park in the Cordillera de Talamanca. The aim of this research was to characterize the soil of high peatbogs to provide scientific information on these ecosystems for future research. Vegetation description and soil samples were taken from four peatbogs (T1, T2, T3 y T4) at different depths (20, 30 y 60 cm) in an altitudinal gradient ranging from 2400 to 3100 m. Physical and chemical analyses of the soil were carried out in the laboratory of the CIA-UCR, and the vegetation of the peatbogs was described. The soils in the peatlands correspond to the Histosol order with a sandy loam texture, which predominate in cold and swampy areas. The percentage of carbon and organic matter was high in T3 32.90 % and 47.05% respectively, while the C/N ratio was higher in T1 with a ratio of 22.30 %. The sites with the highest similarity were T2 and T4 at 99 %. The vegetation characterization was represented by vascular plants, bryophytes, especially of the genus *Sphagnum* and lichens that contribute to the formation of the peaty soil. Peatlands are efficient in accumulating carbon in the soil due to the organic matter that accumulates. The lack of studies makes it difficult to compare the results of this study. It is hoped that this research will be a valuable contribution to science and to consolidate the conservation of the small extension of high peatbogs in the country.

Index words: carbon, high altitude wetlands, organic matter, soil.

INTRODUCCIÓN

El suelo constituye un sistema estructurado, heterogéneo y discontinuo; desarrollado a partir de cambios físicos, químicos y biológicos de la roca madre. Está compuesto por materia orgánica, minerales y nutrientes, los cuales permiten el crecimiento de los organismos y los microorganismos (García, *et al.*, 2012; Mendoza y Espinoza, 2017). Así mismo, el suelo es considerado uno de los hábitats con mayor

riqueza de especies, debido a que alberga más de una cuarta parte de toda la biodiversidad mundial (Lazarova, *et al.*, 2011), y posee una enorme abundancia de microorganismos, los cuales son fundamentales para los ecosistemas (Flores y Alcalá, 2010; Laban, *et al.*, 2018; Pérez-Carreta, *et al.*, 2021), debido principalmente a su rol como descomponedores de la materia orgánica (Flores y Alcalá, 2010; Laban, *et al.*, 2018).

En las tierras altas de Costa Rica, existen formaciones ecológicas que han sido poco estudiadas, tal es el caso del páramo y los humedales de altura conocidos como turberas. Los suelos de las tierras altas se caracterizan por tener patrones y factores edáficos extremos, similares a los páramos andinos (Kapelle y Van Uffelen, 2005). En un estudio edafológico realizado por Van Uffelen (1991) sobre la taxonomía de los suelos paramunos en Costa Rica, se pudo determinar la presencia de Histosoles, Entisoles, Inceptisoles y Andisoles. Además, este estudio menciona que existen procesos fundamentales como la andolización y el hidromorfismo, que intervienen en la formación del suelo en las tierras altas (Van Uffelen, 1991). La andolización hace referencia a la formación de un suelo oscuro como resultado de la transformación mineral, mientras que el hidromorfismo se da en suelos formados bajo condiciones de saturación de agua y se relacionan con mal drenaje (Kapelle y Van Uffelen, 2005).

Los páramos se caracterizan por presentar suelos mayormente de origen volcánico, paisajes bioclimáticos desarbolados, fríos y se localizan entre los 3200 y 3800 metros de altitud (Castañeda-Martín y Montes-Pulido, 2017), mientras que las turberas de altura presentan suelos compuestos de materia orgánica, están saturados de agua permanente o semipermanente, dominados por cojines de musgo *Sphagnum* spp., y otras briófitas, juncos, líquenes y arbustos (Díaz, *et al.*, 2015).

A nivel mundial las turberas son ecosistemas de gran valor ecológico debido a la gran cantidad de biodiversidad que albergan y en algunos casos mantienen un alto grado de especies endémicas. Asimismo, cumplen un rol fundamental en el ciclo hidrológico, debido a su gran capacidad de retención de agua; y en el del carbono, por su eficiencia en la captura y almacenaje de éste, y su función para mitigar la variabilidad climática

(Hernández, 2010; FAO, 2017; Coral, 2021; Monsalve, *et al.*, 2021). En general, el suelo turboso participa en el almacenamiento del carbono gracias a la acumulación de las capas de turba; donde el dióxido de carbono (CO₂) es fijado en el suelo a través de las plantas desde la atmosfera, para convertirlo en carbono orgánico. Pese a que en los suelos de humedales el promedio de descomposición de la materia orgánica es bajo debido a las condiciones anaeróbicas, el potencial para almacenar carbono es alto (IDEAM, 1999; Pontevedra, *et al.*, 2004; Hernández, 2010; Coral, 2021).

Los suelos turbosos están compuestos por sustancias orgánicas, a partir de la descomposición de restos vegetales que se han acumulado sobre terrenos anegados y mal drenados, formando así ecosistemas con alto contenido de materia orgánica que desempeñan funciones ambientales importantes (Inisheva, 2006; León y Reyes, 2018).

Las turberas en Costa Rica se ubican mayormente en el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte en la Cordillera de Talamanca, en un gradiente altitudinal que va desde los 2400 hasta los 3400 m.s.n.m. aproximadamente (Chaverri y Cleef, 1996). Se caracterizan por ser de tipo ombrotáficas debido a que su principal aporte de agua proviene de las precipitaciones. Presentan suelos saturados de agua y ricos en materia orgánica, debido a la descomposición del material vegetal que forma el suelo turboso; además, son sitios de gran endemismo de flora y fauna de tierras altas (Chaverri y Cleef, 1996; Gastezzi-Arias, *et al.*, 2021).

Estos ecosistemas mantienen los procesos hidrológicos, ecológicos y biológicos de las tierras altas y contienen biodiversidad adaptada a vivir en condiciones de saturación permanente de agua, con reducido contenido de oxígeno y pocos nutrientes, lo que hace especial su estudio y conservación (Roig y Roig, 2004; León y Reyes, 2017; Gastezzi-Arias, *et al.*, 2021).

En términos generales, el suelo realiza funciones clave como el reciclaje de nutrientes, la absorción de desechos orgánicos, el mantenimiento de su estructura, el intercambio de gases, entre otros (Laban, *et al.*, 2018; Mendoza y Espinoza, 2017). Por otro lado, los suelos turbosos son especialmente eficientes en almacenar carbono por largos periodos de tiempo, ya que están saturados de agua y la turba posee baja

concentración de oxígeno, pH, nutrientes y temperatura, lo cual limita la descomposición por hongos y microorganismos (Flores y Alcalá, 2010; Loisel, 2015; Laban, *et al.*, 2018).

Las turberas como ecosistemas cumplen diversas funciones y ofrecen una gran gama de servicios ecosistémicos; sin embargo, han sido escasamente estudiadas en Costa Rica, quedando rezagadas de los esfuerzos de conservación en tierras altas. Por ello, el objetivo de este estudio fue caracterizar el suelo de las turberas de altura del Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, con el fin de aportar información científica sobre estos ecosistemas para futuras investigaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionaron cuatro turberas, tres (T1, T2 y T3) situadas dentro del Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte (9.55478°N, 83.75962°W) y una más (T4) en la Reserva Biológica Cerro Vueltas (9.62169°N, 83.85669°W), Costa Rica (Fig. 1). Los sitios fueron seleccionados a partir de un gradiente altitudinal entre los 2400 hasta los 3100 m.s.n.m., y fueron elegidos a conveniencia, tomando en cuenta la seguridad y fácil acceso de los investigadores. Las turberas en estudio son estacionales, caracterizadas por ser ambientes heterogéneos con terrenos mayormente irregulares y con mal drenaje, lo que permite que el agua se acumule. En época lluviosa, se forman estanques de diferente tamaño debido al escurrimiento natural del agua de lluvia; sin embargo, en época seca, estos espejos de agua desaparecen, mas no se pierde la humedad del suelo, ya que la presencia de briófitos y líquenes, mantienen su humedad. Presentan un suelo del orden Histosol, suborden Sphagnofibrists, constituidos principalmente por musgos del género *Sphagnum* (USDA, 2014). En cada sitio se realizó una descripción general de la vegetación y un muestreo del suelo en el mes de julio del 2021, durante la época lluviosa en Costa Rica.

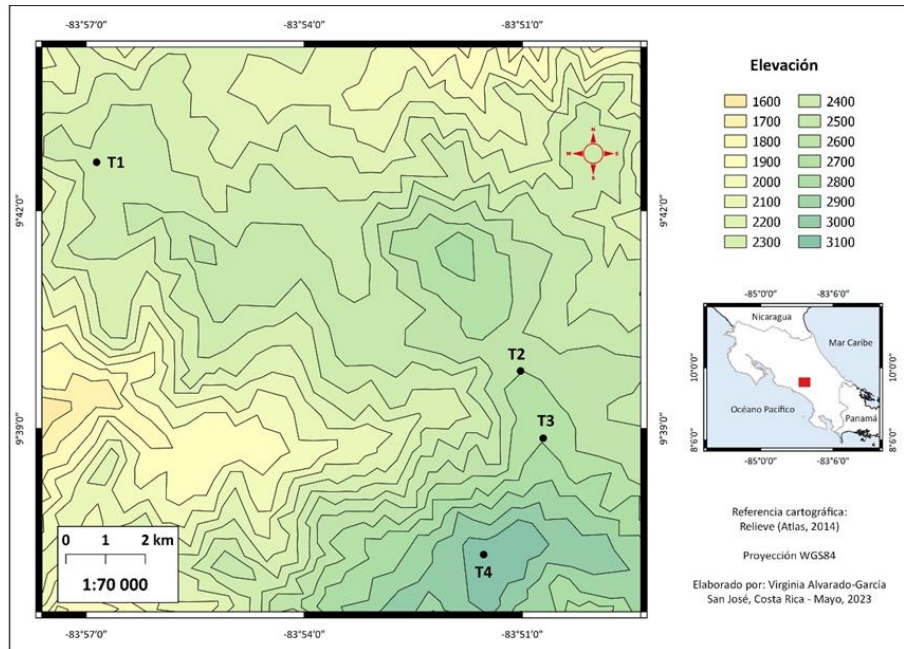


Figura 1. Ubicación de las turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica. T1-4 (Turbera 1-4).

Figure 1. Location of the high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica. T1-4 (High peatbogs 1-4).

Muestreo

Vegetación: la caracterización florística trata de delimitar unidades de vegetación según las especies representativas o diferenciales que son indicadoras de las condiciones ecológicas de un determinado ecosistema (Rangel y Velázquez, 1997). Para ello, se establecieron parcelas circulares de 2 m de radio en cada turbera para la identificación *in situ* de las especies más abundantes de plantas vasculares y no vasculares ubicadas en el suelo. Además, se realizó una descripción general de las características biofísicas de cada turbera, y observaciones generales en el bosque adyacente a cada turbera (Brak, *et al.*, 2005; Rangel y Velázquez, 1997; Chaverri y Cleef, 1996).

Suelo: utilizando un barreno telescópico de suelo marca AMS de 2-3/4", se recolectó una muestra compuesta de 1 kg de suelo en cada sitio (Fig. 2). Cada muestra

compuesta estuvo conformada por seis muestras simples o submuestras a 20, 40 y 60 cm de profundidad (dos extracciones de cada una), las cuales fueron homogenizadas en un recipiente para obtener una muestra final por sitio. Cada muestra compuesta fue rotulada y empacada en bolsas plásticas tipo ziploc para su traslado al laboratorio y su procesamiento físico (textura) y químico completo (KCI-OLSEN+CN) para determinar pH, acidez, Capacidad de intercambio catiónico (CICE), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Carbono (C), Nitrógeno (N), relación C/N y Materia orgánica (MO). Previo a la toma de muestras, se removió la capa superficial de vegetación y hojarasca, aproximadamente en un diámetro de 30 cm (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015).



Figura 2. Registro fotográfico de la recolección de muestras compuestas de suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica (Fotos: P. Gastezzi-Arias).

Figure 2. Photographic record of the collection of composite soil samples in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica. (Photos by: P. Gastezzi-Arias).

Por otro lado, en cada sitio se utilizaron cilindros metálicos de 4 cm de altura, 5 cm de diámetro interno aproximadamente, 6 cm de diámetro externo y 4 mm de grosor de la pared (Fig. 3), para el análisis de densidad aparente, densidad de partículas, porosidad y conductividad hidráulica.

Toma de muestra en cilindros para el análisis de la densidad aparente y conductividad hidráulica en suelo turboso



Figura 3. Registro fotográfico de la recolección de muestras de suelo con cilindros en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica (Fotos: P. Gastezzi-Arias).

Figure 3. Photographic record of soil sample collection with cylinders in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica (Photos by: P. Gastezzi-Arias).

Las muestras fueron recolectadas siguiendo las recomendaciones de USDA (1999). La densidad aparente se obtuvo por medio del método del cilindro, el cual consiste en clavar el cilindro con un mazo y un bloque de madera hasta el ras del suelo; posteriormente y con la ayuda de una pala pequeña se retira el cilindro de manera

cuidadosa y se envuelve en papel aluminio y se resguarda en una bolsa plástica, para evitar pérdidas de muestra y contaminación por mal manejo.

Todas las muestras de suelo para realizar su respectivo análisis físico y químico fueron llevadas al Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA-UCR). El método utilizado para la determinación granulométrica o textura del suelo fue el tradicional método de Bouyoucos con tiempo de lectura de dos horas. En este análisis se utilizó una solución dispersante (37.5 g de Hexametáfosfato de sodio y 7.14 g de carbonato de sodio en 1 L), y alcohol amílico (Henríquez y Cabalceta, 2012; Forsythe, 1985). Para conocer la densidad de partículas se utilizó el método del agua, midiendo el volumen desplazado de líquido por una masa conocida de suelo en un frasco volumétrico de volumen conocido. La porosidad se determinó a partir de la densidad aparente y la densidad de partículas. Por otro lado, para el análisis de conductividad hidráulica se la obtuvo mediante la teoría del movimiento del agua en un suelo saturado, basado en el modelo de la Ley de Darcy, cuya unidad de medida es en centímetros por hora (cm h^{-2}) (Henríquez y Cabalceta, 2012).

Análisis estadístico

Dada la importancia del C, N, MO y la relación C/N en las turberas, únicamente éstos fueron analizados; para ello, se aplicó la prueba de diferencia entre dos proporciones independientes por medio del software estadístico VassarStats.net (Lowry, 2015), para comparar diferencias significativas en cuanto a la proporción química de las turberas. Además, se realizó un análisis de similitud de Morisita entre los sitios de estudio y los componentes antes mencionados, mediante el programa PAST 4.10 (Hammer, *et al.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los páramos y las turberas de altura coexiste una importante relación entre las características del suelo y la vegetación que lo cubre, debido a que ésta es la principal fuente de entrada de materia orgánica al suelo, la cual se descompone lentamente, debido a las bajas temperaturas y elevada humedad en estos sitios (Llambí, *et al.*, 2012).

La composición química y la estructura física del suelo de los páramos y turberas de altura están determinados por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, la topografía y por los cambios producto de las actividades humanas a través del tiempo. Sin embargo, ambos poseen características comunes desde el punto de vista físico, debido a que contienen gran cantidad de materia orgánica y carbono en el suelo (Castañeda-Martín y Montes-Pulido, 2017; Orellana, *et al.*, 2016).




La caracterización de la vegetación en todas las turberas estuvo relacionada con el bosque premontano. Las briófitas y los líquenes fueron los grupos más abundantes, debido a que éstos contribuyen en la formación del suelo turboso, gracias a la materia orgánica en descomposición; en tanto que, las plantas vasculares fueron escasas. La vegetación briófitas y líquenes se encontró principalmente sobre el suelo y sustratos en descomposición como troncos y ramas, y estuvo representada principalmente por musgos del género *Sphagnum*, *Caribaeohypnum* y *Breutelia* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de la vegetación relacionada con el suelo en las turberas de altura Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.

Table 1. Description of soil-related vegetation in the high peatbogs of Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica.

Sitio de estudio	Altitud (msnm)	Descripción
Turbera 1 (T1)	2400	Está cubierta de vegetación herbácea, en su mayoría de ciperáceas, juncos y en el suelo, por musgos (<i>Sphagnum</i> spp). En los alrededores de estas turberas existen parches de bosque secundario y arbustos dispersos. En la época seca, el agua escurre totalmente y el suelo queda húmedo por la presencia de musgos.



Turbera 2 (T2)	2600	<p>Alrededor de esta turbera, predominan árboles aislados y vegetación arbustiva como helechos (<i>Blechnum</i> spp), puya (<i>Puya dasylirioides</i>), ericáceas y herbáceas. El suelo está mayormente cubierto de musgos (<i>Sphagnum</i> spp, <i>Caribaeohypnum</i> spp., y <i>Breutelia</i> spp.) y líquenes. En la época seca, el agua disminuye su nivel y el suelo en su totalidad se mantiene húmedo y lodoso durante todo el año. Esta turbera presenta pequeños drenajes naturales con agua que desaguan de acuerdo con la irregularidad del terreno.</p>	
Turbera 3 (T3)	2800	<p>Esta turbera posee suelos lodosos y con materia orgánica en descomposición visible. Está rodeada por vegetación herbácea, arbustos, helechos (<i>Blechnum</i> spp), puya (<i>Puya dasylirioides</i>), ericáceas, y el suelo está mayormente cubierto de musgo (<i>Shagnum</i> spp y <i>Caribaeohypnum</i> spp). En la época seca, el agua escurre bajando el nivel de agua sin desaparecer.</p>	
Turbera 4 (T4)	3100	<p>Esta turbera es estacional; la vegetación está representada por bosque secundario subalpino y herbazal de páramo, con presencia de helechos arborescentes (<i>Blechnum</i> spp), puya (<i>Puya dasylirioides</i>) y chusquea (<i>Chusquea subtessellata</i>). En la época lluviosa se hace visible grandes cuerpos de agua; en tanto que, en la época seca se deseca completamente y el suelo queda descubierto en su totalidad sin perder humedad en sus alrededores por la presencia del musgo (<i>Shagnum</i> spp) y líquenes.</p>	

Las turberas de altura de Costa Rica son ecosistemas que mantienen una flora y fauna específica, que contribuye a la biodiversidad de las tierras altas. Acero-Rodríguez & León-Vargas (2016) y Díaz, *et al.*, (2008) mencionan que la vegetación de las turberas es dominada por plantas que crecen a ras de suelo, formando densas poblaciones del musgo del género *Sphagnum* y plantas vasculares de la familia de las ciperáceas y

juncáceas, principalmente, y además la vegetación juega un rol importante por el aporte de materia orgánica en la formación de turba. Esto coincide con lo encontrado en este estudio, al identificar vegetación común y presencia de musgos *Sphagnum* spp en todas las turberas estudiadas. Igualmente, se podría mencionar que el perfil de la vegetación en el ecotono de cada una de las turberas no es homogéneo, esto debido a que se encontraron diferentes comunidades de plantas vasculares, briófitos y líquenes a diferentes altitudes.

Por otro lado, los suelos de las turberas de altura han sido escasamente estudiados; sin embargo, se han realizado investigaciones descriptivas de los suelos del páramo de Costa Rica (Van Uffelen, 1991; Kapelle y Van Uffelen, 2005), entre los 2000 y 3400 m.s.n.m, donde se han descrito siete suelos principales distribuidos en cuatro órdenes, Histosoles, Entisoles, Inceptisoles y Andosoles. Además, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) ha contribuido en la realización de estudios edafológicos en los humedales de Costa Rica; pero no se ha profundizado más allá de una clasificación de los suelos de acuerdo con las valoraciones taxonómicas y la capacidad de uso de las tierras (SINAC, 2017).

En este estudio, respecto a la caracterización física, se evidenció que todas las turberas estuvieron compuestas mayoritariamente por arena y en menor cantidad, por arcilla. La T1 registró proporciones de arena y limo similares; mientras que la T2, T3 y T4 presentaron valores de arena por encima del 70 %, y limo y arcilla por debajo del 20 %. La T1 presentó una textura franco; mientras que, el resto de las turberas presentó una textura franco-arenosa (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis físico del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.

Table 2. Soil physical analysis in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica.

Sitios	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Densidad de partículas (g cm ⁻³)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica (cm h ⁻²)
T 1	45	43	12	F	0.4	1.1	64	570
T 2	76	15	9	FA	0.2	1.8	89	646.8
T 3	73	17	10	FA	1.6	1.8	11	575.1
T 4	75	20	5	FA	0.3	1.7	82	663.5

F: Franco, FA: Franco arenoso.

Por otro lado, la T3 reportó la mayor densidad aparente y la menor porosidad; sin embargo, en la mayoría de los sitios, la densidad de partículas y la conductividad hidráulica, se mantuvo en un rango similar. Los valores reportados en el análisis de la T3 con alta densidad aparente y baja porosidad, podrían deberse a que el suelo de esta turbera presenta signos de compactación, lo que supone una alteración antropogénica (remoción del suelo, desvío de drenajes naturales) debido a la cercanía con la carretera interamericana que conecta el Valle Central con la Zona Sur de Costa Rica. Así mismo, el alto contenido de MO también podría ser explicado por causas antropogénicas, ya que los desvíos en el flujo natural de la escorrentía podrían favorecer a que el material vegetal se acumule y se descomponga, aumentando el porcentaje de MO en el sitio.

Por otro lado, el suelo de los bosques premontanos (por debajo de las zonas de páramo), donde se encuentran ubicadas las turberas de altura, están caracterizados por presentar suelos del orden Histosoles, con alto contenido de materia orgánica y que son predominantes en zonas frías y pantanosas con poco drenaje (Van Uffelen, 1991; Kapelle y Van Uffelen, 2005).

Esto coincide con lo mencionado por el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 1999) y Llambí, *et al.*, (2012) en estudios realizados en suelos del páramo colombiano, donde se demuestra que a altitudes superior a los 2000 m.s.n.m. predominan suelos franco arenosos con alto porcentaje de porosidad (60 al 90 %), valores bajos de la densidad aparente (0.4 a 0.8 g/cm³) y densidad de partículas, y alta conductividad hidráulica. Estas características permiten que los suelos sean permeables, con mejor aireación y drenaje natural, facilitando el desarrollo de raíces. Estos aspectos físicos del suelo son similares a los descritos en este estudio, lo que indica que el suelo de las turberas tiene semejanza con los suelos del páramo; además, posee un alto porcentaje de materia orgánica, que se relaciona con la cobertura vegetal mayormente briofita y liquénica, que es la principal fuente de materia orgánica de los suelos turbosos.

Con respecto al análisis químico, los micro y macroelementos, el pH, la acidez y el CICE, fluctuaron en cada una de las turberas (Cuadro 3). Los iones de Ca, Mg y K fueron bajos con respecto a los otros elementos como el P, Cu, Fe, Zn y Mn; sin embargo, en términos generales y según un estudio en Andisoles de Costa Rica, los valores de Ca, Mg, K, P y el Zn son deficientes; mientras que el Mn es suficiente y el Cu es alto (Cabalceta y Molina, 2006). Los valores obtenidos a partir de los análisis del suelo podrían obedecer a lo esperado para turberas de altura *per se*. Sin embargo, la falta de estudios del suelo turboso no permite comparar estos resultados.

Cuadro 3. Análisis químico de los componentes para del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.

Table 3. Chemical analysis of soil components in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica.

Sitios	pH	Acidez	cmol(+)/L				mg/L					%			
			Ca	Mg	K	CICE	P	Zn	Cu	Fe	Mn	C	N	MO	C/N
	5.5*	0.5*	4*	1*	0.2*	5*	10*	3*	1*	10*	5*				
T1	4.9	3.88	0.79	0.26	0.26	5.19	4	0.6	6	161	4	29.18	1.31	41.73	22.3
T2	4.4	9.78	1.75	0.42	0.13	12.08	4	1.2	6	320	4	19.48	1.04	27.86	18.7
T3	4.5	4.29	0.83	0.39	0.14	5.65	2	1.6	4	374	7	32.90	1.74	47.05	18.9
T4	4.9	3.86	0.51	0.30	0.23	4.90	6	0.5	7	332	3	18.86	1.42	26.97	13.3

*Valores críticos según el CIA.

Según Sánchez-Murillo, *et al.*, (2022) las turberas de altura en Costa Rica contienen altas concentraciones de MO en el suelo y altos niveles de carbono orgánico disuelto. Esto explica que, la descomposición de la gran cantidad de MO y los taninos presentes en el agua favorecen al aumento de los valores de pH, acidez y Fe (O. Vargas, comunicación personal, 9 de agosto del 2023). Con respecto al C, N y MO, los valores más altos se reportaron en la T3; mientras que la relación C/N fue mayor en T1 (Cuadro 3). Los valores de nitrógeno fueron más bajos con relación al carbono, posiblemente por la fijación de bacterias acidofóbicas que permiten la descomposición de la MO. Esto concuerda con los altos valores de MO y la relación C/N.

Varios autores, mencionan que en los suelos del orden Histosoles predomina material orgánico acumulado en capas profundas, cuya producción supera su descomposición cuando las condiciones de equilibrio están presentes (Kapelle y Van Uffelen, 2005; Martínez y García-Rodeja, 2009; INTA, 2015;). Los suelos de las turberas

de altura están formados por la acumulación de materia orgánica que se denomina turba, que es un material que resulta de la descomposición de restos orgánicos de origen vegetal principalmente del musgo *Sphagnum*, que es mayormente común en el suelo de las turberas. El USDA (1999) y el INTA (2015), mencionan que los suelos del orden Histosoles, poseen como mínimo un 20 % de materia orgánica, lo cual concuerda con este trabajo, donde los valores oscilaron entre 26.97 a 47.05 %. Esto indica que es un suelo con alta producción de materia orgánica debido a la acumulación de restos vegetales y por la acción de los factores biofísicos del ecosistema.

De acuerdo con la proporción de C, N, MO y relación C/N en cada sitio, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en el carbono y la materia orgánica (Cuadro 4). Si bien es cierto, no se encontraron diferencias significativas en los contrastes de las turberas para el nitrógeno y la relación C/N ($z=0.142$, $p=0.443$), en términos generales, hubo contenidos altos de carbono y nitrógeno (principalmente en la T3) y en la relación C/N y materia orgánica (mayoritariamente en la T1), lo que permite inferir que las turberas son eficientes en acumular carbono en el suelo, gracias al proceso de descomposición y acumulación de materia orgánica.

Cuadro 4. Prueba de diferencia de proporciones entre los componentes MO, C y la relación C/N del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.

Table 4. Test of difference of proportions between MO, C components and soil C/N ratio in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica.

Sitios	C		MO	
	z	p	z	p
T1 y T2	1.66	0.098	2.06	0.038 *
T1 y T3	-0.61	0.540	-0.71	0.477
T1 y T4	1.66	0.098	2.23	0.026 *
T2 y T3	-2.26	0.024 *	-2.76	0.006 *
T2 y T4	0.18	0.429	0.16	0.875
T3 y T4	2.26	0.024 *	2.93	0.003 *

* Diferencias significativas al 5 %

Pontevedra, *et al.*, (2004), Hernández (2010), Loisel (2015) y Laban, *et al.*, (2018), indican que un alto porcentaje de carbono y nitrógeno está relacionado a la anegación y humedad de los suelos la mayor parte del año, el poco oxígeno y nutrientes en el agua, la influencia de temperaturas bajas, y una alta radiación solar asociada con la vegetación; lo que podría indicar que existe una buena relación entre los microorganismos del suelo y los procesos de mineralización de la materia orgánica.

El índice de similitud de Morisita reportó un coeficiente de correlación de 0.731 y dos grupos bien definidos: A (T2 + T4) y B (T1+ T3). Los sitios con mayor similitud fueron T2 y T4 en un 99 % (Fig. 4); sin embargo, en la descripción de la vegetación (Cuadro 1), se evidenció que son ecosistemas heterogéneos y presentan características biofísicas diferentes entre sí, lo que podría deberse a que se encuentran a diferente elevación, al

tipo de vegetación, a la humedad del suelo, la radiación solar, y la presencia de cuerpos de agua en cada una de ellas.

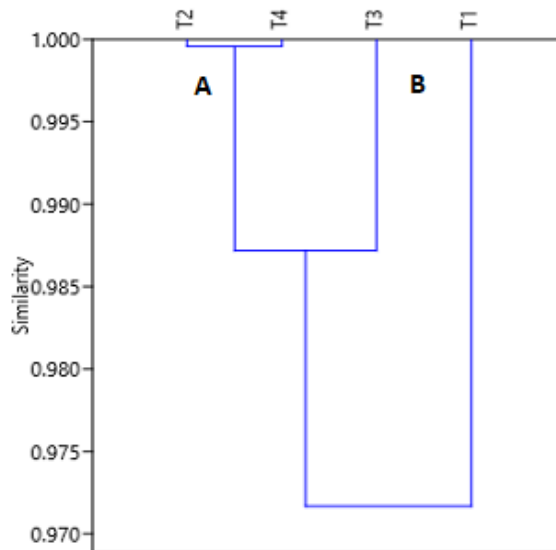


Figura 4. Dendrograma para los sitios de muestreo y los componentes fisicoquímicos del suelo en turberas de altura, Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte, Costa Rica.

Figure 4. Dendrogram for sampling sites and soil physicochemical components in high peatbogs, Tapantí Macizo de la Muerte National Park, Costa Rica.

En un estudio realizado en los suelos del páramo colombiano, Llambí, *et al.*, (2012) reportaron valores altos de porosidad (> 60 %) y mencionaron que la conductividad hidráulica de estos suelos está relacionada con el contenido de agua y la velocidad con la que ésta se mueve en el interior del suelo; por lo que, esta información permite inferir que, posiblemente el suelo de la T2 y T4 con valores altos en la porosidad (> 80 %) y la conductividad hidráulica (> 645 cm h⁻¹, con respecto a T1 y T3, tengan las mismas características de un suelo del páramo y de ahí su similitud.

CONCLUSIONES

Se enfatiza la importancia de los suelos turbosos debido a la alta capacidad para almacenar carbono y actuar como reguladores del recurso hídrico. Además, se destaca la estrecha relación entre las características del suelo y la vegetación de las turberas de altura, caracterizada mayormente por líquenes y briófitos, especialmente musgos del género *Sphagnum*; la cual juega un papel fundamental en la formación y acumulación de la materia orgánica del suelo turboso. El alto contenido de materia orgánica, aunado a las propiedades físicas del suelo turboso facilitan el desarrollo de raíces, mientras que su perfil químico refleja adaptaciones a las condiciones de anegación y humedad. La similitud en las características físicas y químicas de los suelos en diferentes turberas podría indicar influencias similares de factores como la elevación, patrones de lluvias, radiación solar, entre otros. En conjunto, este estudio proporciona un mayor entendimiento de la interacción entre la vegetación y los suelos en las turberas de altura, así como de su importancia para la conservación de estos ecosistemas y la biodiversidad de las tierras altas.

CONFLICTO DE INTERESES: Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES: Conceptualización e idea principal: PGA. Metodología, trabajo de campo y análisis de muestras: PGA. Escritura: preparación de borrador original: PGA y JPQ. Escritura: revisión y edición final: VAG y JPQ. Adquisición de fondos: PGA.

FONDOS: La investigación tuvo el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y el Laboratorio de Vida Silvestre y Salud de la Universidad Estatal a Distancia (UNED), Costa Rica.

AGRADECIMIENTOS: A Ligia Bermúdez de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) por su colaboración y contribución al manuscrito; a Oldemar Vargas Gutiérrez del CIA-UCR por su valiosa ayuda y aportes a este manuscrito, así como, por el préstamo de equipo para la toma de muestras de suelo. Se expresa un especial agradecimiento al Parque Nacional Tapantí Macizo de la Muerte-SINAC, a Yarenis Chavarría y Daniel Martínez Araya por su colaboración en el trabajo de campo.

LITERATURA CITADA

- Acero-Rodríguez, M. & León-Vargas, Y. (2016). Caracterización de una turbera de *Sphagnum* L., asociada al bosque montano en Mérida, Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 39(2), 204-230.
- Aguilar-Garavito, M. & Ramírez, W. (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Brak, B., Vroklage, M., Kapelle, M. & Cleef, A. (2005). Comunidades vegetales de la turbera de altura "La Chonta" en Costa Rica. En: Kapelle M. & Horn S. P. (Eds). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.
- Cabalчета, G. & Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrientes en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 31-44.
- Castañeda-Martín, A.E & Montes-Pulido, C.R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Revista Entramado* 13(1), 210-221
<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Coral Paredes, E. M. (2021). *Almacenamiento de carbono orgánico en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha* [Tesis presentada para optar al título de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo]. Universidad Nacional de Colombia.
- Chaverri, A., & Cleef, A. (1996). Las comunidades vegetacionales en los páramos de los macizos del Chirripó y Buenavista, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 15(5), 44-49.
- Chavarría, F. J. (2011). *Folleto de Edafología*. (1era Ed.). Caldas, Colombia: Espacio Gráfico Comunicaciones S.A.
- Díaz, M. F., Silva, W. & León, C. A. (2015). Características de los ecosistemas de turberas, factores que influyen en su formación y tipos. En Domínguez, E & Vega, D. (Eds.) *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*. Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

- Díaz, M. F., Larrín, J., Zegers, G. & Tapia, C. (2008). Caracterización florística e hidrológica de las turberas de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 8(4), 455-468. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2008000400002>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.
- Forsythe, W. (1985). Física de suelos: manual de laboratorio. Editorial IICA.
- Flores, L. & Alcalá, J. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. D. F., México: Departamento de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México, Disponible en: <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Gastezzi Arias, P., Martínez Araya, D. & Jones Román, G. (2021). Distribución altitudinal de la riqueza y diversidad de aves en turberas de altura, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 13(2), e3716. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i2.3716>
- García, Y., Ramírez, W. & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Hammer, Ø., D. A. T., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontología Electrónica*, 4(1), 1-9.
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147.
- Henríquez, C., & Cabalceta A., G. (2012). Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola (2da Ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- IDEAM (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales de Bogotá). (1999). *El macizo colombiano y su área de influencia: Modulo hídrico*. Santa Fe de

- Bogotá, Colombia: Ministerio del Ambiente de Colombia. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009517/ELMACIZO.pdf>
- Inisheva, L. I. (2006). Peat Soils: Genesis and Classification. *Eurasian Soil Science*, 39(7), 699–704. DOI:[10.1134/S1064229306070027](https://doi.org/10.1134/S1064229306070027)
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (2015). *Suelos de Costa Rica: orden Histosol*. Boletín técnico. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencias en Tecnología Agropecuaria. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1824.pdf>
- Kappelle, M. & Van Uffelen, J. G. (2005). Los suelos de los páramos de Costa Rica. En: Kappelle M. & Horn S. P. (Eds). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.
- Laban, P., Metternicht, G. & Davies, J. (2018). *Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas*. Gland, Suiza: UICN. <https://doi.org/10.2305/UICN.CH.2018.03.es>
- Lazarova, S., Elshishka, M., Peneva, V. & Biserkov, V. (2011). *Soil biodiversity in a changing environment*. Conference: International Conference 100 Years Bulgarian Soil Science 16-20 May 2011, 746-749 pp. Sofía, Bulgaria.
- León Alfaro, Y. & Reyes Chaves, J. (2018). Delimitación y descripción biofísica de dos turberas y una laguna endorreica en Salsipuedes-Cerro Asunción, Tapantí - Parque Nacional Macizo de la Muerte, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 10(1). <https://doi.org/10.22458/urj.v10i1.2030>
- Loisel, J. (2015). Las turberas como sumideros de carbono. En Domínguez, E & Vega, D. (Eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes* (pp. 295-313). Punta Arenas, Chile: Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Lowry, R. (2015). VassarStats.net: Website for Statistical Computation. Recuperado de <http://vassarstats.net/>

- Llambí, L. D, Soto-W, A., Célleri, R., DeBievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Páramos Andinos: Ecología hidrología y suelos de paramos*. Cuenca, Ecuador: Editorial Monsalve Moreno.
- Martínez Cortizas, A., & García-Rodeja Gayoso, E. (2009). Grupo 7. Turberas, turberas bajas y áreas pantanosas. En VV.AA. (Eds). *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. (pp. 1-9). Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Mendoza, R & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria, Programa de Agricultura, Suelo y Agua, Fundación Haward Buffett y Catholic Relief Services. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Monsalve, E., Muñoz-Arriagada, R., Bahamonde, N & Vidal, O. (2021). Caracterización ecológica de una turbera ombrogénica en Magallanes: hacia una propuesta de bioindicadores de monitoreo ambiental. *Gayana Botánica*, 78(1), 38-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432021000100038>
- Orellana-Mendoza, E., Choque-Bonifacio, F., Zúñiga-López, D., Páucar-Carrión, J., Piñatelli-Bracamonte, M. & Baltazar-Zúñiga, D. (2016). Propiedades físicas y químicas del suelo con *Sphagnum magellanicum* Brid, Junín – Perú. *El Ceprosimad*, 4(2): 17-25.
- Pérez-Carreta, A., Mora-Ortiz, R. S., Mora-Ortiz, T. J., Munguía-Balvanera, E., & Cálix-Madrigal, V. I. (2021). Preparación de muestras de suelo y su influencia en la determinación del límite líquido en diferentes tipos de suelos. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.19136/jeeos.a5n1.4551>
- Pontevedra Pombal, A., Martínez Cortizas, A., & Buurman, A. P. (2004). Las turberas de montaña de Galicia como sumideros de carbono. *Edafología*, 11(3), 295-307.

- Rangel-Ch, J.O., & Velázquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En: Rangel-Ch, J.O., P. Lowy-C, M. Aguilar-P. (Eds.) *Diversidad Biótica II. Tipos de Vegetación en Colombia*. Editorial Guadalupe Ltda.
- Roig, C. & Roig, F. A. (2004). Consideraciones generales. En Blanco, D. E. & De la Balze, V. M. (Eds.) *Los Turbales de la Patagonia: Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad* (pp.5-21). Buenos Aires, Argentina: Wetlands International.
- Sánchez-Murillo, R., Gastuzzi-Arias, P., Sánchez-Gutiérrez, R., Esquivel-Hernández, G., Pérez-Salazar, R., & Poca, M. (2022). Exploring Dissolved Organic Carbon Variations in a High Elevation Tropical Peatland Ecosystem: Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Frontiers in Water* 3(742780). <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.742780>
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). (2017). *Guía para la caracterización y delimitación de suelos hidromórficos asociados a los ecosistemas de humedal*. San José, Costa Rica: MINAE, INTA, proyecto Humedales, GEEF, PNUD.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Washington D. C., Estados Unidos: Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales e Instituto de Calidad de Suelos. Recuperado de: www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrca142p2_051284.pdf
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (2014). Claves para la taxonomía de suelos. Washington D.C, Estados Unidos: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de los Recursos Naturales. Recuperado de: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Van Uffelen, J. G. (1991). *A geological, geomorphological and soil transect study of the Chirripó massif and adjacent area, Cordillera de Talamanca, Costa Rica* [Tesis de Maestría]. Wageningen University. Wageningen.

7. Discusión global

Esta investigación analiza las características biológicas de las turberas de altura, centrándose en aspectos como el suelo, la composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua y la avifauna presente en estos ecosistemas. Para demostrar su calidad ambiental y proponer su conservación, ante los diversos factores ambientales como consecuencia de la variabilidad climática que podrían afectar su rol ecosistémico.

Estructuralmente, en las turberas existe un alto grado de dependencia entre las características del suelo y la vegetación. La principal fuente de materia orgánica de los suelos turbosos proviene de las plantas y sus raíces, que, al morir aportan materia orgánica al suelo. Esta materia orgánica se descompone lentamente, debido a las bajas temperaturas del agua y elevada humedad ambiental (Monsalve, et al., 2021; Llambí, et al., 2012). De acuerdo con lo anterior, en las turberas estudiadas se evidenció una relación ecológica entre las características del suelo y la vegetación que lo cubre. Entre los hallazgos encontrados, se confirma que, la materia orgánica acumulada en el suelo gran parte es la responsable de las propiedades físicas y químicas distintivas de los suelos en estos ecosistemas. Esto se debe a la presencia de musgos del género *Sphagnum* spp, *Caribaeohypnum* spp y *Breutelia* spp, entre otras, junto con las ciperáceas y juncáceas. Esta combinación ha sido una constante en las turberas de altura, lo que concuerda con investigaciones, como las de Mansilla, et al., (2021); León y Reyes, (2018); Castañeda-Martín y Montes-Pulido, (2017); Loisel, (2015), que destacaron el papel de la vegetación, como el musgo *Sphagnum* spp., así como especies de ciperáceas y juncáceas en la formación de turba.

Los estudios de las turberas de altura son escasos en Costa Rica, principalmente lo que respecta al suelo turboso; sin embargo los únicos estudios del suelo son los realizados por Veas-Ayala et al., (2018); Kapelle & Van Uffelen (2005) y Van Uffelen (1991), que describieron los suelos del páramo costarricense y encontraron que estos se caracterizan por tener patrones y factores edáficos extremos, similares a los páramos andinos, compuestos por formaciones ecológicas especializadas, suelos jóvenes y poco desarrollados, además encontraron la existencia de suelos del orden Andisoles, Inceptisoles, Histosoles y Entisoles en las tierras altas.

En relación con lo anterior, esta investigación logró confirmar que los suelos de las turberas de altura pertenecen en su mayoría al orden Histosoles por su alto contenido de materia orgánica (por encima del 20 %), además, registraron valores de materia orgánica (MO) entre 26.97 % y

47.05 %, lo que implica un alto contenido de carbono orgánico disuelto en el suelo, debido a la descomposición de la MO que proviene en su mayoría de la descomposición de los restos de plantas. Esto refiere implicaciones importantes en el ciclo de nutrientes y la biogeoquímica de estos ecosistemas, donde destaca su relevancia en la captura y almacenamiento eficiente de carbono (USDA, 1999). Esto concuerda con lo que menciona el USDA (1999) y el INTA (2015), que los suelos de las turberas acumulan grandes contenidos de materia orgánica como resultado de la descomposición de restos orgánicos de origen vegetal principalmente del musgo *Sphagnum* spp, que es común en el suelo de las turberas. Esto indica que son suelos que se originan por la acción de los factores biofísicos del ecosistema, y que constituyen la base de la formación de turba, lo cual permite diferenciarlos de los suelos convencionales. Así mismo, Martínez & García-Rodeja (2009), Llambí et al., (2012) y Loisel (2015), mencionan que las características físicas y químicas del suelo de las turberas son de los aspectos claves en la composición y estructura del suelo; por lo que, desde el punto de vista ecológico, la composición del suelo turboso cumple un rol fundamental en la captura y almacenamiento de carbono atmosférico, que a su vez, permite estimar la capacidad de las turberas para reducir los efectos de la variabilidad climática.

Es importante mencionar que, esta investigación es pionera en demostrar que una de las turberas estudiadas tiene relación con factores de compactación del suelo que podría estar influenciado por actividades humanas, esto podría deberse como consecuencia de su proximidad a la carretera interamericana. La compactación del suelo podría estar relacionada con la remoción del suelo, falta de drenaje natural, falta de cobertura vegetal, entre otros factores. Este hallazgo resalta la importancia de mejorar la conservación y el manejo adecuado de estas áreas, especialmente en el contexto donde la degradación de los ecosistemas de altura es una preocupación creciente.

Por otra parte, se logró determinar que el suelo posee una relación estrecha con el agua, debido a que esta desempeña un papel fundamental en la estructura de estos ecosistemas únicos. Como se mencionó anteriormente, el suelo de las turberas está compuesto de materia orgánica en descomposición, que actúa como una esponja natural, absorbiendo y almacenando grandes cantidades de agua de lluvia. Estudios realizados por Monsalve et al., (2021); Iturraspe (2015) y Loisel (2015) en turberas de la Patagonia, demostraron que el proceso de retención del agua en una turbera cumple un importante rol en la hidrología al mantener la productividad del suelo y de la vegetación adyacente, además de contribuir a mantener el nivel freático elevado, creando condiciones húmedas y anegadas vitales para su formación y funcionamiento, situación

similar con lo encontrado en esta investigación. Donde el suelo mantiene una productividad de materia orgánica debido a la vegetación en estado de descomposición permanente, condiciones húmedas y mantenido el nivel freático por la acumulación de agua.

Con lo anterior mencionado, la interacción entre el suelo y el agua en las turberas de altura es esencial en la acumulación lenta de material orgánico, que con el tiempo se convierte en turba. Por lo tanto, cualquier alteración en esta relación puede tener consecuencias significativas en su funcionamiento y la biodiversidad que sustentan. Un ejemplo de esto se podría manifestar, si el patrón de lluvias en las tierras altas disminuye. Esto podría influenciar un desequilibrio en la calidad ambiental de las turberas. Cuando el suelo pierde humedad, deja de producir materia orgánica, lo que afecta el ciclo de vida de los macroinvertebrados debido a los bajos niveles de agua, reduciendo aún más el oxígeno y la radiación. Como resultado, las aves que están asociadas a las turberas podrían realizar desplazamientos a otros sitios en busca de recursos.

El estudio del agua de las turberas de altura ha sido utilizado como componente esencial para conocer su calidad mediante el uso de indicadores biológicos y fisicoquímicos. Un estudio realizado por Sánchez-Murillo et al., (2022), sobre la composición química del agua, determinaron que las turberas de altura de Costa Rica contienen altas concentraciones de materia orgánica en suelo y agua, altos niveles de carbono orgánico disuelto, lentas tasas de meteorización de la roca, y bajos efectos de la acción antropogénica local. Estas condiciones encontradas en las turberas, podría explicar el establecimiento de las familias de macroinvertebrados acuáticos hallados en este trabajo, debido a que encuentran las condiciones para su supervivencia por las condiciones favorables de la calidad el agua. Así mismo, Carrasco et al., (2020); Oyague-Passuni y Maldonado-Fonkén (2015); Rivera-Usme et al., (2013); Moya et al., (2009) y Molina et al., (2008), estudiaron turberas y bofedales altoandinos en Perú y Bolivia, donde encontraron que los valores fisicoquímicos del agua son altamente variables, debido a factores ambientales como menor presión atmosférica por la altitud, aporte pluvial, la naturaleza geológica, la composición química del agua, entre otro. Lo que ocurre de manera similar en las turberas de estudio en cuanto a los valores fisicoquímicos registrados en el agua, proporcionando una visión más completa de las condiciones ambientales del agua en las turberas para comprender su dinámica, calidad ambiental y su afectación ante la variabilidad climática.

Las características biológicas y fisicoquímicas del agua favorecen el desarrollo de organismos, como los macroinvertebrados que son usados como bioindicadores de la calidad ambiental del agua. En esta investigación, se identificaron familias dominantes, como

Chironomidae, Hyalellidae y Limnephilidae, la presencia de estas familias brinda una comprensión más profunda de la ecología de estos ecosistemas, que son relevantes para futuras investigaciones y la conservación de la biodiversidad acuática. Estudios como los de Hahn-von Hessberg et al., (2009), Posada-García et al., (2008) y Reyes-Morales (2013) sobre macroinvertebrados en ecosistemas altoandinos, mencionan que la presencia y abundancia de estas familias de macroinvertebrados se debe a su tolerancia a aguas con niveles bajos de oxígeno, similares a las turberas en estudio. En estas turberas, donde los valores del pH del agua fueron bajos (mínimo 4.3 y máximo 5.2); la temperatura del agua (mínima 12.1 y máximo 16.6 °C); y el porcentaje de oxígeno disuelto en agua (mínimo 1.7 y máximo 2.4). Este hallazgo es significativo, porque muestra que estos ecosistemas aparentemente inhóspitos y fríos, albergan comunidades de macroinvertebrados importante en la cadena alimenticia para las aves asociadas a las turberas. Estas comunidades de macroinvertebrados se han adaptado a sobrevivir a condiciones extremas como las bajas temperaturas del agua, acidez, baja concentración de oxígeno, entre otras condiciones, como se mencionó anteriormente. Es importante mencionar que esta investigación documentó por primera vez la diversidad y riqueza de macroinvertebrados acuáticos en el agua de las turberas de altura en Costa Rica, lo que demuestra su vulnerabilidad a los cambios ambientales y a la variabilidad climáticas que podrían afectar directamente al agua de las turberas, produciendo cambios su estructura ambiental.

Por otro lado, para reforzar los datos de las variables fisicoquímicas del agua de las turberas se aplicaron índices de calidad del agua como el ICA-NSF y el BMWP-CR, que usa a las familias de los macroinvertebrados como indicadores. Estos índices ofrecen una evaluación cuantitativa de la salud del ecosistema en las turberas de altura al categorizar la calidad del agua en "media", "regular" o "mala". Estudios en ecosistemas altoandinos como los de Carrasco et al., (2020), Oyague-Passuni et al., (2015), Rivera-Usme et al., (2015), Moya et al., (2009) y Molina et al., (2008), utilizaron los macroinvertebrados como indicadores y los parámetros fisicoquímicos del agua de ríos y bofedales, demostrando su relación en la calidad del agua. Para esta investigación, los resultados de la calidad del agua y su relación con los parámetros fisicoquímicos del agua y los macroinvertebrados, demostró que su calidad es de "mala y crítica", sin embargo, estos resultados no son concluyentes debido a que el uso de los índices ICA-NSF y el BMWP-CR es nuevo para estos ecosistemas, y se evidenció la creación de índices más robustos y adaptados a las condiciones de ambientales de las turberas de altura. Sin embargo, el uso de estos índices de manera exploratoria en esta investigación permitió obtener información biológica por primera vez de la calidad del agua de las turberas, por lo que estos resultados

informan el estado general de estas turberas, lo que es esencial para la conservación y predecir cómo estos ecosistemas podrían responder a futuros cambios ambientales, la variabilidad climática o la contaminación a la que están expuestas.

Esta investigación ha demostrado que biológicamente las turberas son ecosistemas vulnerables, por lo tanto, dependen de la interacción de los factores físicos, químicos y biológicos que ocurren en el suelo y el agua, creando un entorno propicio para una diversidad de fauna adaptada a estas condiciones. De entre todas las especies de fauna que habitan en las turberas de altura, las aves establecen una estrecha relación con el agua y el suelo, ya que estos hábitats húmedos son cruciales para su supervivencia. Así, la relación ecológica entre las aves de turberas, el agua y el suelo ejemplifica cómo la biodiversidad y los ecosistemas están intrínsecamente interconectados.

Muchas especies de aves de alta montaña encuentran una fuente de alimento en las turberas, ya que el agua estancada y la vegetación acuática albergan larvas de insectos y otros invertebrados que constituyen la dieta principal de aproximadamente el 50 % de las aves observadas en las turberas. Esta situación se registró en este trabajo, donde se evidenció que las aves, tanto migratorias como residentes, utilizan las turberas para llevar a cabo sus procesos biológicos, como la alimentación y el anidamiento. Estudios realizados por Veas-Ayala et al., (2018) y Cuesta et al., (2012) demuestran que las turberas mantienen y liberan flujos de agua, y crean hábitats esenciales para las aves, especialmente durante sus migraciones latitudinales y en épocas de caudal mínimo, cuando la alta radiación seca la humedad en la superficie. En referencia a esto, se observó en esta investigación forrajeando a orillas de una de las turberas al Andarríos solitario (*Tringa solitaria*), ave limícola migratoria. Además, se observó la anidación del Pinchaflor plomizo (*Diglossa plúmbea*) en la vegetación dentro de una turbera.

En esta investigación se registraron 75 especies de aves en turberas de altura, de las cuales 33 especies son endémicas de tierras altas, de las 37 registradas por Sandoval y Sánchez (2014), Barrantes (2009) y Stiles y Skutch (1989) en estudios realizados en el páramo y las tierras altas de Costa Rica, este resultado pudo demostrar que existe una alta proporción de especies endémicas y residentes de tierras altas, lo que permite afirmar que las turberas tiene alto valor ecológico, por lo que es importante resaltar que el endemismo en tierras altas es significativo no solo por su valor intrínseco en términos de biodiversidad, sino también por su papel de ser indicadores a la variabilidad climática en tierras altas, por lo que la conservación de estas especies de aves de turberas es esencial para mantener la salud de los ecosistemas de montaña.

Un estudio realizado por Barrantes (2009) sobre el endemismo de aves en tierras altas de Costa Rica, menciona que la formación de las cordilleras y el oeste de Panamá, así como a las condiciones frías de las zonas de alta montaña jugaron un papel importante en determinar la composición de las especies de tierras altas, lo que explicaría el endemismo en las turberas. Vale la pena resaltar que, de las 33 especies endémicas registradas en las turberas, solo seis de ellas están asociadas de manera directa a estos ecosistemas como el Colibrí garganta de fuego (*Panterpe insignis*), Tapaculo (*Scytalopus argentifrons*), Moquerito cabecinegro (*Empidonax atriceps*), Soterrey de bambú (*Thryorchilus browni*), Zorzal gorrirojizo (*Catharus gracilirostris*) y Junco paramero (*Junco vulcani*), para el caso de del Colibrí garganta de fuego, se lo observó polinizando las flores de la puya (*Puya dasylirioides*) especie de planta endémica de la Cordillera de Talamanca, que mantiene relaciones mutualistas con colibríes e insectos para su polinización (Gutiérrez et al., 2004; Stiles y Skutch, 1989), así mismo, el Junco paramero, se lo observó alimentándose de macroinvertebrados en las orillas de una de las turberas.

En este estudio, se destaca la comparación de la diversidad de aves en las diferentes estaciones climáticas (seca y lluviosa), lo que logró documentar que existen diferencias en las estaciones climáticas estudiadas que pueden influir en la presencia y composición de las aves en las turberas de altura. En la estación seca se registraron 41 especies y en la lluviosa 52, lo que podría significar que las aves realizan desplazamientos a otros sitios en busca de recursos. Este conocimiento es significativo para comprender las adaptaciones de las aves a condiciones climáticas cambiantes y podría ser relevante para la conservación en un contexto de variabilidad climática. Lo anterior concuerda con estudios realizados por Loaiza (2017), Rodríguez & Granados (2017), SINAC (2015), Villegas y Garitano-Zavala (2008) y González et al., (2003), que mencionan que el uso de las aves como indicadoras genera información de sus poblaciones y los cambios ambientales y climáticos en un ecosistema por sus patrones de comportamiento en los ecosistemas donde se encuentran.

Es importante mencionar que el reducido número de estudios en Costa Rica de este tipo de ecosistemas no permitió comparar los resultados obtenidos en esta investigación. No obstante, este estudio es pionero y, por lo tanto, los resultados son valiosos para la conservación de las turberas. Además, proporciona información sobre la calidad ambiental de estos ecosistemas y permite la identificación de amenazas potenciales que pueden afectar la fragilidad de las turberas, dentro de las amenazas se destaca el aumento de la frontera agrícola, mala planificación y manejo de desechos como producto del mantenimiento de la carretera

Interamericana, desvío de causas naturales que alimentan de agua a las turberas, entre otros. En este trabajo, se logró caracterizar las turberas y su calidad ambiental, demostrando que cumplen su rol ecológico debido a su capacidad de almacenar agua, captar carbono en el suelo y mantener una rica diversidad de especies de aves endémicas de las tierras altas.

Asimismo, se evidencia que las turberas podrían enfrentar muchos desafíos relacionados con cambios estructurales, como la degradación del hábitat, afectación de su calidad ambiental y ecológica por una posible disminución en los patrones de lluvias, cambios en la fenología de la vegetación, entre otros, como consecuencia de la variabilidad climática. Finalmente, esta investigación sienta las bases para futuras investigaciones y la toma de decisiones informadas destinadas a proteger y conservar estos ecosistemas únicos y frágiles en las tierras altas de Costa Rica. Esto constituye una base informativa para entender el estado ecológico de las turberas, dado que las turberas de alturas difieren de los conocidos como los bosques, manglares, ríos, en otros ambientes estudiados y se encuentran vulnerables ante los efectos de la variabilidad climática.

8. Conclusiones

La presente investigación de Tesis Doctoral tuvo como objetivo analizar la estructura biológica y la calidad ambiental de las turberas de altura mediante el uso de indicadores biológicos y fisicoquímicos, para el fortalecimiento de su conservación y adaptación a la variabilidad climática. En este contexto, se llevaron a cabo diversas etapas del estudio, como la caracterización del suelo de las turberas mediante la utilización de parámetros fisicoquímicos para documentar los componentes que las conforman, el uso de macroinvertebrados como indicadores biológicos para evaluar la calidad del agua y su composición en los cuerpos de agua superficiales de las turberas, y un análisis de la avifauna para comprender las características biológicas de las turberas y detectar cambios estructurales en estos ecosistemas.

Los hallazgos de esta investigación han destacado la relevancia de las turberas de altura desde una perspectiva biológica, ecológica y climática. La conservación de estas turberas es esencial para preservar su biodiversidad única de las tierras altas y contribuir a la mitigación de la variabilidad climática. No obstante, se ha evidenciado que las turberas enfrentan múltiples desafíos relacionados con cambios estructurales, como la degradación del hábitat, la disminución en los patrones de lluvias, y alteraciones en la estructura del hábitat y la vegetación, todo ello como consecuencia de la variabilidad climática.

A pesar de la falta de estudios comparativos en Costa Rica sobre este tipo de ecosistemas, esta investigación pionera porque proporciona información valiosa para la conservación de las turberas. Además, ha permitido comprender la calidad ambiental de estos ecosistemas e identificar posibles amenazas que podrían afectar su fragilidad.

Entre los hallazgos más significativos de esta investigación, se logró caracterizar el suelo permitido comprender su composición y características distintivas, como la alta acumulación de materia orgánica, el pH ácido y otros parámetros fisicoquímicos descritos por primera vez en una turbera de altura en Costa Rica. Estos elementos son fundamentales para fortalecer la conservación de las turberas de altura. No obstante, se debe prestar atención a problemas como la compactación del suelo turboso.

Por otra parte, la determinación en la composición de macroinvertebrados en los cuerpos de agua superficiales demostró ser una herramienta efectiva para evaluar la calidad del agua y la salud de estos ecosistemas acuáticos. Además, ha permitido la detección temprana de problemas ambientales y la implementación de estrategias de gestión adecuadas. La presencia de ciertas especies de macroinvertebrados ha subrayado la diversidad de organismos indicadores de la productividad primaria, destacando la necesidad de desarrollar metodologías e índices adaptados a las características de las turberas para medir la calidad del agua.

No obstante, el análisis de la calidad del agua ha subrayado la importancia de realizar estudios periódicos a lo largo del tiempo para evaluar la relación entre la calidad del agua y la fauna de macroinvertebrados acuáticos. Esto podría servir como base fundamental para comprender el estado ecológico de las turberas, especialmente dada su vulnerabilidad a los efectos de la variabilidad climática.

El uso de las aves como indicadores de la calidad del ecosistema demostró que las tierras altas de Costa Rica sustentan un alto endemismo de aves y que los cambios estructurales del hábitat podrían cambiar debido a la variabilidad climática, es importe destacar que si existieron diferencias entre la diversidad de aves en las dos estaciones del año (seca y lluviosa), lo que subraya la importancia de las turberas desde una perspectiva biológica y ecológica.

En resumen, las turberas de altura son ecosistemas frágiles que sustentan biodiversidad y procesos ecológicos esenciales para las tierras altas de Costa Rica. No obstante, la variabilidad climática puede afectar las características fisicoquímicas del agua y el suelo, lo que influye en la descomposición de la materia orgánica, el contenido de carbono y nutrientes en el suelo, y la

formación de la turba. Las fluctuaciones en el nivel del agua pueden alterar la dinámica de nutrientes y los procesos biológicos del ecosistema, lo que afecta de manera directa a la biodiversidad endémica que sustentan las tierras altas.

En conclusión, esta investigación contribuye al fortalecimiento de la conservación de las turberas de altura y su capacidad de adaptación a los desafíos presentados por cambios ambientales. Por lo que el diseño de estrategias de manejo para la conservación de las turberas de altura debe abordar los retos actuales y futuros, incluyendo la adaptación a la variabilidad climática, lo que requerirá la colaboración de las autoridades, científicos y la sociedad en general.

9. Recomendaciones

Es importante tener en cuenta que las turberas de altura son ecosistemas de gran valor para la conservación de la biodiversidad, la regulación del clima y el bienestar humano, que deben ser estudiados y monitoreados a largo plazo, especialmente debido al papel crucial que desempeñan en la provisión de servicios ecosistémicos importantes. La degradación de las turberas podría tener efectos negativos en las comunidades microbianas presentes en el suelo y el contenido de materia orgánica, sobre los organismos que viven en el agua y en sus características fisicoquímicas, y además en su biodiversidad, por lo que se recomienda que futuras investigaciones tengan en cuenta los siguientes aspectos:

- Es necesario inventariar y delimitar mediante el uso de cartografía de las turberas para obtener información detallada sobre la ubicación y extensión, lo que facilitaría su estudio, debido a que algunas turberas el acceso es complicado por la irregularidad del terreno donde se ubican.
- Se necesitan monitoreos a largo plazo que potencien el poder mitigador de las turberas al cambio climático, mediante la cuantificación de carbono almacenado en el suelo, el cálculo de emisiones de los gases de efecto invernadero, con la finalidad de registrar el rol importante de este ecosistema.
- Realizar monitoreos sobre la dinámica del carbono en el suelo de las turberas, para contar con soportes científicos que apoyen decisiones sociales y políticas, en pro de la preservación global del carbono del suelo, de la sostenibilidad del suelo y de las funciones ambientales que este cumple en la naturaleza.

- Aplicar métodos sobre regulación hídrica en las turberas, debido a que un posible aumento en las temperaturas y los regímenes de estacionalidad climática podrían disminuir, lo que implican un impacto directo en las turberas, especialmente en las lagunas estacionales debido a su menor superficie y profundidad.
- Determinar las características de los microorganismos que son claves del suelo, como arqueas, bacterias y protozoos, los cuales han sido poco estudiados y cumplen funciones ecológicas muy importantes en la formación del suelo turboso y su composición.
- Es necesario realizar monitoreos periódicos a una escala temporal de evaluación de la calidad del agua y su relación con la fauna de macroinvertebrados acuáticos para conocer su relación con el ecosistema de altura. Para estos monitoreos es necesario realizarlos en época seca y lluviosa.
- Se recomienda crear índices de calidad del hábitat o del estado de conservación del ecosistema más integrales, que tome en cuenta los rasgos funcionales de las turberas más que los niveles de tolerancia de los cuerpos de agua, debido a la naturaleza estructural de las turberas de altura.
- Es importante diseñar y aplicar metodologías e índices más robustos y adecuados para estos ecosistemas lenticos e intensificar los muestreos donde se utilicen una combinación de métodos de captura de macroinvertebrados para comprobar la presencia de otros taxones que determinen la calidad del agua.
- Se sugiere incrementar las investigaciones que contemplen un análisis ecológico del hábitat donde se encuentran las turberas y realizar monitoreos de aves en tierras altas a largo plazo para detectar cambios en las comunidades de aves y su relación con la variabilidad climática, debido a que se desconoce si estas siguen un patrón similar a lo registrado en otras turberas de Costa Rica y Latinoamérica.

- Se necesita analizar las asociaciones vegetales, para identificar especies claves para las turberas, endemismo de especies para la formación del ecosistema y su relación con condiciones climáticas de la zona, con el fin de reforzar el plan de manejo y conservación.
- Es importante resaltar que se deben realizar análisis paleoclimáticos en las turberas, con la finalidad de obtener información valiosa sobre su formación en el pasado. Las turberas, constituyen verdaderos bancos de datos, ya que por su crecimiento continuo registran información sobre las condiciones ambientales y climáticas de la zona donde existen.
- Involucrar la interacción de la sociedad civil local que se involucre en la conservación de estos ecosistemas, y que a su vez se unan esfuerzos para la implementación de programas de protección de las fuentes hídricas, cambio de uso de suelo, y educación ambiental, así como velar por el cumplimiento de la legislación existente sobre la protección de los ecosistemas de humedales y del recurso hídrico.

10. Referencias

- Aguilar, B., & M. Rodríguez. (2016). Régimen Jurídico Nacional de los Humedales en Costa Rica. Fundación Neotrópica. San José, Costa Rica. 42 pp. Disponible en: <http://neotropica.org/wp-content/uploads/2016/11/Regimen-Juridico-Nacional-de-l-os-Humedales-en-Costa-Rica.pdf>. Acceso el 12/05/2019.
- Ahumada, M., F. Aguirre., M. Contreras., & A. Figueroa. (2011). Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos. División de Recursos Naturales y Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente, Unidad de Gestión Ambiental del Departamento de Protección de Recursos Naturales del Servicio Agrícola y Ganadero, y Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas. Chile. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-53554_guiaConsSeguimientoHumedales2011.pdf. Acceso el 28/05/2019.
- Acuña-Piedra, J.F & Elizondo-Campos, E.C. (2018). Inventario Nacional de Humedales para Costa Rica: resultados preliminares. *Revista Ambientico*, 266, 4-9.
- Barrantes, G. (2005). Aves de los páramos de Costa Rica. En: M. Kapelle & Horn, SP. (Eds.), *Paramos de Costa Rica* (pp.521- 532). Editorial INBio.
- Barthelmes, A. & Joosten, H. (2018). Lineamientos sobre mejores prácticas para realizar inventarios de turberas tropicales a fin de facilitar su designación como sitios Ramsar. Nota Informativa de Ramsar nº 9. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar. Disponible en: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn9_peatland_inventory_s.pdf
- Blanco, D. E. & V. M. de la Balze (eds.). (2004). Los Turbales de la Patagonia: Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad. Publicación No. 19. Wetlands International. Buenos Aires, Argentina. 149pp. Disponible en: <file:///G:/Turberas%20y%20CC/bibliografia%20sobre%20turberas/Turbales%20de%20la%20Patagonia%20-%20parte%20I.pdf>
- Bravo, J. (2015). Propuesta Metodológica para actualizar y elaborar el inventario Nacional de Humedales. Proyecto “Conservación, uso sostenible de la biodiversidad y mantenimiento de los servicios de los ecosistemas de humedales protegidos de importancia internacional”, Proyecto PIMS 4966 ID 00088054. Proyecto de Humedales, PNUD, SINAC, GEF.

Disponible

en:

<https://www.sinac.go.cr/ES/docu/coop/proy/Propuesta%20MetodoI%C3%B3gica%20Inventario%20de%20Humedales.pdf>

Brak, B., Vroklage, M, Kappelle, M & A. Cleef. (2005). Comunidades vegetales de la turbera de altura "La Chonta". En: Páramos de Costa Rica. Editorial INBio.

Benavides, J.C. (2013). Perturbaciones en las turberas de páramo: la acción del hombre y el clima. En: Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia.

Bermúdez, M., & Sánchez, J. (Eds.). (2000). Identificación de vacíos de información Botánica en Centroamérica. Ediciones WWF -Centroamérica. <https://bit.ly/3ozbvQc>

Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.

Castañeda-Martín, A.E y Montes-Pulido, C.R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Revista Entramado* 13(1), 210-221
<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>

Castilla, J. C., J. J., Armesto & M. J. Martínez-Harms (Eds.). (2021). Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica, 600 pp.

Castro, M. (2005). Complejo turbera de la Chonta. En X. Izurieta. (Ed.), Turberas Altoandinas. Espacios Frágiles de Vida y Cultura (pp. 1-6). Quito, Ecuador: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/ ECOPAR/GRUPO PARAMO.

Carrasco, C., Rayme, C., Alarcón, R. P., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H. (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú. *Revista Biología Tropical*, 68(S2), S116–S131.

Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M. T., Postigo, J., & Peraldo, M. (2012). Panorama andino sobre cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales. Lima, Perú: CONDESAN-SGCAN.

- Chaverri, A. & Cleef, A. (1996). Las comunidades vegetacionales en los páramos de los macizos del Chirripó y Buenavista, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 15(5), 44-49.
- Díaz, M. F., Silva, W. & León, C. A. (2015). Características de los ecosistemas de turberas, factores que influyen en su formación y tipos. En Domínguez, E & Vega, D. (Eds.) *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*. Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Díaz, M.F., Larraín, J., Zegers, G. & C. Tapia. (2008). Caracterización florística e hidrológica de turberas de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* (81): 455-468.
- Díaz, M. F., Silva, W. & León, C. A. (2015). Características de los ecosistemas de turberas, factores que influyen en su formación y tipos. En Domínguez, E & Vega, D. (eds.) *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*. Colección Libros INIA- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike. Punta Arenas, Chile. 334 pp.
- Díaz, M.F., Zegers, G. & Larraín, J. (2005). Antecedentes sobre la importancia de las turberas y el pompoñ en la Isla de Chiloé. 33 p. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/48034398>
- Domínguez, E & N. Bahamonde. (2012). Manual de Evaluación de turberas de *Sphagnum*. Caso de estudio: efecto de la extracción de turberas sobre el paisaje, Región de Magallanes, Chile.
- Domínguez, E & Vega, D. (2015). Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes. Colección de libros INIA No 33. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike. Punta Arena, Chile. 334pp.
- Domínguez, E., & Martínez, M.P. (Eds.). (2021). Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de *Sphagnum* spp en la región de Aysén. Colección de libros INIA N°41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike. Coyhaique, Chile. 344 pp.
- FAO. (2015). Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático. En: 2015 Año Internacional de los suelos. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/es/?page=3>

- Flores, L. & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. D. F., México: Departamento de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México, Disponible en: <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Finlayson, C. M., and G. R. Milton. 2018. Peatlands. In C. M. Finlayson, G. R. Milton, R. C. Prentice, and N. C. Davidson (Eds.) *The Wetland Book: II: Distribution, Description, and Conservation*. pp. 227–244, Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-%20007-4001-3_202
- Grasset, Ch., Rodríguez, C., Delolme, C., Marmonier, P & Gudrun, B. (2017). Can soli organic carbon fractions be used as functional indicators of wetlands?. *Society of Wetlands Scientists* (37), 1195–1205. <https://doi.org/10.1007/s131570170951z>.
- Gómez, L.D. (1986). *Vegetación de Costa Rica*. Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED). San José. 327 pp.
- González-Ortega, M.A., Guzmán-Hernández, J., Martín-Gómez M.F., & Domínguez-Velázquez, L.E. (2003). Un método para la selección de aves bioindicadoras con base en sus posibilidades de monitoreo. *Huitzil Revista Mexicana de Ornitología*, 4(2), 10-16.
- Gutiérrez, A., Rojas-Nossa, S., & Stiles, G. (2004). Dinámica anual de la interacción colibrí-flor en ecosistemas altoandinos. *Revista Ornitología Neotropical*. 15: 205–213.
- Hahn-von Hessberg, C., Toro, D., Grajales-Quintero, A., Duque-Quintero, G. & Serna-Uribe, L. (2009). Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos, en la estación piscícola. *Boletín Científico Museo Historia Natural*, 13(2), 89-105. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30682009000200007&script=sci_abstract&tlng=pt
- Hooghiemstra, H., Cleef, A., Noldus, C., & Kappelle, M. (1992). Upper Quaternary vegetation dynamics and palaeoclimatology of the La Chonta bog area (Cordillera de Talamanca, Costa Rica). *Journal Of Quaternary Science*, 7(3), 205-225. <https://doi.org/10.1002/jqs.3390070303>
- Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2017). Estado de los humedales: nuevos desafíos para su gestión, contribución especial. Defensoría de los habitantes, CONARE, Las Universidades Públicas por la Vida, el dialogo por la paz.

- Inisheva, L. I. (2006). Peat Soils: Genesis and Classification. *Eurasian Soil Science*, 39(7), 699–704.
- IPCC (2007). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Enhen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B. et al. (Eds.). New York: Cambridge University Press.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (2015). Suelos de Costa Rica: orden Histosol. Boletín técnico. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencias en Tecnología Agropecuaria. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1824.PDF>
- Iturraspe, R. (2010). Las turberas de Tierra del Fuego y el cambio climático global. Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.
- Iturraspe, R. (2015). Hidrología de turberas. En Domínguez, E & Vega, D. (Eds.). Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes (pp. 99-120). Punta Arenas, Chile: Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Kaeslin, E., Redmond, I., & Dudley, N (eds.). (2013). La fauna silvestre en un clima cambiante. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, Italia. 122 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/017/i2498s/i2498s.pdf>.
- Kappelle, M., & Horn, S.P. (2005). Páramos de Costa Rica. Editorial INBio. 767 pp.
- Kappelle, M. & Van Uffelen, J. G. (2005). Los suelos de los páramos de Costa Rica. En: Kappelle M. & Horn S. P. (Eds). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.
- Larraín, J. (2015). Musgos y hepáticas en las turberas. En: E. Domínguez y D. Vega-Valdés (eds.). Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes. Colección de libros INIA N° 33. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike. Punta Arenas, Chile. 334 pp.
- León Alfaro, Y. & Reyes Chaves, J. (2018). Delimitación y descripción biofísica de dos turberas y una laguna endorreica en Salsipuedes-Cerro Asunción, Tapantí - Parque Nacional Macizo de la Muerte, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 10(1). <https://doi.org/10.22458/urj.v10i1.2030>

- León, C.A., Gabriel, M., Rodríguez, C., Iturraspe, R., Savoretti, A., Pancotto, V., Benítez-Mora, A., Valdés, A., Diaz, M.F., Oberpaur, C., Domínguez, E., Fernández, L.D., Mackenzie, R., Roland, T., Mauquoy, D., & Silva, C. (2021). Peatlands of Southern South America: a review. *Mires and Peat*, 27(3). 29pp. [Doi:10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.2021](https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.2021)
- Loaiza, C. (2017). Dinámica temporal y espacial de la comunidad de aves en un gradiente altitudinal de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, vertiente Caribe. *Revista Caldasia*, 39(2), 310. <https://dx.doi.org/10.15446/caldasias.v39n2.60647>
- Loisel, J. (2015). Las turberas como sumideros de carbono. En Domínguez, E & Vega, D. (Eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes* (pp. 295-313). Punta Arenas, Chile: Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Llambí, L. D, Soto-W, A., Céleri, R., DeBievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Páramos Andinos: Ecología hidrología y suelos de paramos. Cuenca, Ecuador: Editorial Monsalve Moreno.
- Mansilla, C.A., Domínguez, E., Mackenzie, R., Hoyos-Santillán, J., Henríquez, J.M., Aravena, J.C., Villa-Martínez, R. (2021). Capítulo 6: Turberas de la Patagonia Chilena: distribución, biodiversidad, servicios ecosistémicos y conservación. *En*: Castilla, J. C., Armesto, J. J., y Martínez-Harms, M. J. (Eds.) *Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos*. Ediciones Universidad Católica.
- Martínez Cortizas, A., & García-Rodeja Gayoso, E. (2009). Grupo 7. Turberas, turberas bajas y áreas pantanosas. En VV.AA. (Eds). *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. (pp. 1-9). Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Mejía, J.F., González, J.D & Albarrán, A. (2022). Influencia de la variabilidad climática en los pantanos altoandinos de la microcuenca Miguaguó, Andes Venezolanos. *Revista de Ciencias Ambientales*. 56(2) 38-62. <https://doi.org/10.15359/rca>.
- Meza-Aliaga, M, & Díaz-Villalobos, Y. (2014). Efectos de la variabilidad climática sobre las fluctuaciones del nivel de las aguas y actividad ganadera en humedales altoandinos. *Revista Interciencia*, 39(9) 651-658.
- Monsalve, E., Muñoz-Arriagada, R., Bahamonde, N., & Vidal, O.J. (2021). Caracterización ecológica de una turbera ombrogénica en Magallanes: hacia una propuesta de

- bioindicadores de monitoreo ambiental. *Gayana Botánica*, 78(1) 38-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432021000100038>
- Molina, C. I., Gibon, F. M., Pinto, J., & Rosales, C. (2008). Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 106-116. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.365>.
- Moor, H., Rydin, H., Hylander, K., Nilsson, M. B., Lindborg, R., & Norberg, J. (2017). ESSAY REVIEW: Towards a trait-based ecology of wetland vegetation. *Journal of Ecology*, 105(6), 1623-1635. <http://www.jstor.org/stable/45029452>
- Moya, N., Gibon, F. M., Oberdorff, T., Rosales, C., & Domínguez, E. (2009). Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano: Implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecología Aplicada*, 8(2), 105-114. <https://doi.org/10.22458/urj.v8i1.1225>
- Monsalve, E., Muñoz-Arriagada, R., Bahamonde, N & Vidal, O. (2021). Caracterización ecológica de una turbera ombrogénica en Magallanes: hacia una propuesta de bioindicadores de monitoreo ambiental. *Gayana Botánica*, 78(1), 38-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432021000100038>
- Otero, A.E., Mosquera, A.L., Silva, C.G & J.C. Guzmán. (2001). Paramos de Colombia. Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente. Colombia. Disponible en: <http://www.imatedores.com/banocc/paramos/bibliografia.htm>
- Oyague-Passuni, E., & Maldonado-Fonkén, M. S. (2015). Relationships between aquatic invertebrates, water quality and vegetation in an Andean peatland system. *Mires and Peat*, 15(14).
- Ponce, J.F., A.M.J, Coronato., M. Fernández., J.O, C. Roig. (2014). Las turberas de Tierra del Fuego y el clima del pasado. *Ciencia Hoy*, 23(137),11-17.
- Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 50(1): 25-39. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.50-1.2>
- Posada-García, J.A., G, Abril-Ramírez & Parra-Sánchez, L. N. (2008). Diversidad de los macroinvertebrados acuáticos del Páramo de Frontino (Antioquia, Colombia). *Caldasia*, 30(2), 441-455. <http://www.jstor.org/stable/23641903>

- Proyecto Humedales de SINACPNUD-GEF (2018). Inventario Nacional de Humedales. SINAC/PNUD/GEF. 172 pp. Disponible en: <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/Inventario%20Nacional%20Humedales/INVENTARIO%20NACIONAL%20DE%20HUMEDALES%20-%20Final.pdf>
- Quinteros-Gómez, Y. M., Monroy-Vilchis, O. y Zarco-González, M. M. (2021). Turberas en Valle del Alto Mayo, Perú: importancia, amenazas y perspectivas de conservación. *CIENCIA ergo-sum*, 28(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v28n1a10>
- Ramil-Rego, P., Rodríguez Guitián, M.A. (Eds.) (2017). Hábitats de turbera en la Red Natura 2000. Diagnóstico y criterios para su conservación y gestión en la Región Biogeográfica Atlántica. Horreum-Ibader, Lugo. 427p.
- Ramsar. (2002a). Lineamientos para la acción mundial sobre las turberas, Resolución VIII.17. "Humedales: agua, vida y cultura" 8ª. Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales. Valencia, España. Recuperado de: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/guide/guide-peatlands-s.pdf>
- Ramsar (2002b). Resolución VIII.11 de la COP8. Orientación adicional para identificar y designar tipos de humedales insuficientemente representados como Humedales de Importancia Internacional. En: "Humedales: agua, vida y cultura". 8ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). Valencia (España).
- Reyes-Morales, F. (2013). Macroinvertebrados acuáticos de los cuerpos lénticos de la Región Maya, Guatemala. *Científica*, 23(1) 7-16. <https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v23i1.107>
- Rivera-Usme, J. J., Pinilla-Agudelo, G. A., & Rangel-Churio, J. O. (2013). Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables físicas y químicas en el humedal de Jaboque-Colombia. *Caldasia*, 35(2), 389–408.
- Rodríguez-Arias, C., & Silva-Benavides, A.M. (2017). Los Humedales de la Quebrada Estero en San Ramón, Costa Rica: importancia y estado actual. Posgrado y Sociedad *Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado*, 15(1), 13-26. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1822>
- Rodríguez, C., & Granados, I. (2017). Diversidad de aves de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes y su área de amortiguamiento, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 17(1), 74-95.

- Sánchez-Murillo, R., Gastezzi-Arias, P., Sánchez-Gutiérrez, R., Esquivel-Hernández, G., Pérez-Salazar, R., & Poca, M. (2022). Exploring Dissolved Organic Carbon Variations in a High Elevation Tropical Peatland Ecosystem: Cerro de la Muerte, Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Frontiers in Water* 3(742780). <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.742780>
- Sandoval, L., & Sánchez, C. (2014). Lista de aves de Costa Rica: décima octava actualización. Unión de Ornitólogos de Costa Rica. <http://uniondeornitologos.com/wp-content/uploads/2014/07/Lista-de-Aves-de-Costa-Rica-XVIII.pdf>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2017). Política Nacional de Humedales 2017–2030. Ministerio de Ambiente y Energía. Disponible en: <http://presidencia.go.cr/wp-content/uploads/2017/03/Politica-Nacional-de-Humedales-1.pdf>.
- Soto, M. (2 febrero del 2015). Costa Rica posee 12 humedales de importancia internacional. La Nación. Disponible en: http://www.nacion.com/vivir/ambiente/Costa-Rica-humedales-importancia-mundial_0_1467253400.html
- Suárez E., Chimbolema S. & R. Jaramillo. (2022). Turberas de páramo en el Ecuador: Notas sobre la ecología, conservación, y restauración de un ecosistema estratégico. Imprenta Don Bosco, Quito. 124 pp.
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). (2015). Diagnóstico del Plan de Manejo de la Reserva Biológica Cerro Vueltas. Área de Conservación Pacífico Central (ACOPAC). Costa Rica. 156 p. Recuperado de: <https://canjeporbosques.org/wp-content/uploads/2017/07/Diagn%C3%B3stico-3.pdf>
- Stiles, F.G., & Skutch, A.F. (1989). A guide to the birds of Costa Rica. Ithaca, Nueva York: Cornell University Press.
- UNEP. (2022). Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Washington D.C., Estados Unidos: Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales e Instituto de Calidad de Suelos. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051284.pdf

- Van Uffelen, J. G. (1991). *A geological, geomorphological and soil transect study of the Chirripó massif and adjacent area, Cordillera de Talamanca, Costa Rica* [Tesis de Maestría]. Wageningen University. Wageningen.
- Veas-Ayala, N., Quesada-Román, A., Hidalgo, H.G & Alfaro, E.J. (2018). Humedales del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica: características, relaciones geomorfológicas y escenarios de cambio climático. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1436-1448 <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.31477>
- Villegas, M., & Garitano-Zavala, A. (2008). Las comunidades de aves como indicadores ecológicos para programas de monitoreo ambiental en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Ecología en Bolivia*, 43(2), 146-153. <https://ecologiaenbolivia.com/documents/Villegas432.pdf>
- Weston, A.S. (1981). Páramos, cienagas, and subpáramo forest in the eastern part of the Cordillera de Talamanca. Unpublished report prepared for the Tropical Science Center, San José, Costa Rica. 25 p.
- Wright, E.L.; Black, C.R., Turner, B.L & Sjögersten, S. (2013). Environmental controls of temporal and spatial variability in CO₂ and CH₄ fluxes in a neotropical peatland. *Global Change Biology* 19, 3775–3789.
- Yavitt, J., Lang, G.E, & Downey, D.M. (1988). Potential methane production and methane oxidation rates in peatland ecosystems of the Appalachian Mountains, United States. *Global Biogeochemical Cycles* 2(3), 253-268. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pfd/10.1029/GB002i003p00253>
- Yu, Z., Loisel, J., Brosseau, D.P, Beilman, D.W & Hunt, S. (2010). Global peatland dynamics since the last glacial maximum. *Geophysical Research Letters*, 37(L13402): 1-5. <https://doi:10.1029/2010GL043584>

ANEXO 1

Producción científica

Publicaciones científicas relacionadas al tema de tesis

- Sánchez-Murillo, R., Gastezzi-Arias, P., Sánchez-Gutiérrez, R., Esquivel-Hernández, G., Pérez-Salazar, R., & Poca, M. (2022). Exploring Dissolved Organic Carbon Variations in a High Elevation Tropical Peatland Ecosystem: Cerro de la Muerte, Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Frontiers in Water* 3(742780). <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.742780>
- Chavarría-Valverde, Y., **Gastezzi-Arias, P.**, & Ana Victoria Wo Ching Wong, A.V. (2024). Aprovechamiento de los musgos y líquenes en el Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 21(48):48-55. DOI: [10.18845/rfmk.v21i48.7039](https://doi.org/10.18845/rfmk.v21i48.7039)
- Chavarría-Valverde, Y., **Gastezzi-Arias, P.**, & Ana Victoria Wo Ching Wong, A.V. (2024). Características biológicas de los musgos y líquenes en dos sitios del Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Revista Rupturas* 14 (2):119-44. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/rupturas/article/view/5415>

Participación en proyecto Internacional relacionado al tema de tesis

El estudio de las turberas es un tema de interés nacional y regional, y además novedoso, y a partir del interés que suscitaron los resultados de mi tesis, actualmente participo como coinvestigadora en el proyecto de investigación “**Evaluación y línea base de nuevas áreas potenciales de turbera en el Caribe y Pacífico de Panamá**”, financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Panamá y ejecutado por la Fundación Wetlands International capítulo Panamá.