

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO**

***Caracterización biofísica y determinación del
intercambio de gases de efecto invernadero en las
turberas de Talamanca, Costa Rica***

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado
como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE*
En Mitigación y Adaptación al Cambio Climático**

Lucía Del Mar Corrales Ulate

Turrialba, Costa Rica

2018

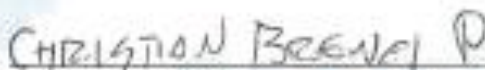
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN
AL CAMBIO CLIMÁTICO**

FIRMANTES:



Miguel Cifuentes, Ph.D.
Codirector de tesis



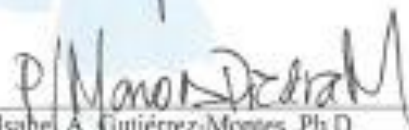
Christian Brenes, M.Sc.
Codirector de tesis



Bryan Finegan, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Mario Chacón, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Escuela de Posgrado



Lucía del Mar Corrales Ularte
Candidata

DEDICATORIA

Esta tesis, en primera instancia, se la dedico a mi Dios por guiarme siempre por el buen camino y darme las fuerzas cuando ya no las tenía.

A mi familia, porque por ella, soy lo que soy actualmente. Principalmente a mis padres: mi madre Silvia, por su apoyo incondicional, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos más difíciles, y por ayudarme con todos los recursos necesarios para estudiar.

Una dedicación especial para mi padre, **Lenín Corrales**: tu esfuerzo ha sido impresionante y tu amor para mí siempre ha sido invaluable. Me has educado y proporcionado todas las cosas que he necesitado a lo largo de mi vida. Tus enseñanzas las aplico cada día de mi existir y la verdad no tengo palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí. Realmente tu ayuda fue fundamental para la culminación de esta tesis y no hubiera llegado tan largo sin tu presencia en mi vida.

TE AMARE POR SIEMPRE

Ellos me han dado todo lo que soy como persona: mis valores, principios, carácter, empeño, perseverancia y coraje para conseguir mis objetivos.

¡¡Los amo!!

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios y a la vida por la oportunidad de haber estudiado llegado tan largo. En especial le agradezco a mis papás por todo el apoyo emocional, financiero y logístico que me han brindado durante toda esta travesía.

A Javier Segura, por su colaboración en la construcción de materiales y la logística de las giras y el trabajo de campo; por todo su apoyo incondicional a lo largo de la elaboración de la tesis y por estar siempre presente en mi vida.

A mi Comité, que siempre me respaldó y ayudó cuando lo necesité y, aún más importante, me comprendió y tuvo paciencia en este proceso. Y en general, a todas las personas que estuvieron presentes y apoyando la tesis e investigación a lo largo de este proceso.

Un agradecimiento especial para el Proyecto "Conservación, uso sostenible de la biodiversidad y mantenimiento de los servicios de los ecosistemas de humedales protegidos de importancia internacional "(Proyecto Humedales del SINAC-PNUD-GEF) Proyecto PIMS 4966 ID 00088054 por el apoyo financiero brindado para llevar a cabo esta investigación.

Realmente sin ninguno hubiera llegado hasta donde llegue.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XII
1. Introducción	1
2. Objetivos y preguntas de investigación	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos y preguntas de investigación	4
3. Síntesis referencial	5
3.1. Terminología y conceptos adoptados	5
3.1.1. Turba	5
3.1.2. Turbera	5
3.2. Formación	6
3.2.1 Tipología de turberas	7
3.2.1.1 Tipología según turbales	8
3.2.1.2 Tipología hidrogenética	9
3.3. Importancia de las turberas	11
3.4. Distribución mundial y en Costa Rica	12
3.4.1. Turberas de Costa Rica	13
3.5. Amenazas globales para las turberas	14
3.5.1. Prácticas agrícolas	14
3.5.2. Drenado	15
3.5.3. Contaminación atmosférica	16
3.5.4. Forestación	16
3.5.5. Extracción de turba	16
3.5.6. Infraestructura	17
3.5.7. Otros usos	18

3.6. Turberas y mitigación al cambio climático	18
3.7. Almacenamiento de carbono	19
3.8. Flujos de GEI	20
4. Metodología	21
4.1 Elaboración de mapa	22
4.2. Descripción biofísica de las turberas	26
4.2.1. Análisis florístico	27
4.2.2. Variables biofísicas	28
4.3. Cuantificación de carbono en suelos	29
4.4. Cuantificación de gases de efecto invernadero en los suelos de las turberas	29
4.4.1 Intercambio de GEI	30
5. Resultados y discusión	31
5.1. Mapa	32
5.2. Descripción biofísica de las turberas	35
5.2.1. Análisis florístico	35
5.2.2. Variables biofísicas	37
5.3. Carbono almacenado en suelos	40
5.4. Intercambio de gases efecto invernadero	43
7. Literatura citada	47
ANEXOS	55

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Objetivos específicos y sus respectivas preguntas de investigación.....	4
Cuadro 2. Extensión global aproximada de las turberas en el trópico.....	13
Cuadro 3. Descripción de los usos del suelo identificados en las turberas de Talamanca, Costa Rica..	23
Cuadro 4. Clasificación de la turbera mediante el pH según la propuesta de Sjörs (1950).....	29
Cuadro 5. Diseño del Cuadrado Latino empleado en el estudio.....	30
Cuadro 6. Matriz de confusión generada para determinar la confiabilidad del mapa final de ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica.....	33
Cuadro 7. Extensión aproximada del área estudiada según el uso del suelo. Cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	34
Cuadro 8. Estructura taxonómica de la flora de las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	36
Cuadro 9. Índice de valor de importancia (IVI) ecológica de las 10 especies florísticas más importantes de las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	37
Cuadro 10. Clasificación las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica mediante pH.....	38
Cuadro 11. Pruebas de hipótesis secuenciales.....	41
Cuadro 12. Carbono almacenado (Mg ha ⁻¹) en las turberas estudiadas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica, según profundidad.....	42
Cuadro 13. Comparación de la concentración de carbono almacenado en las turberas de la cordillera de Talamanca (resultados del presente estudio) con los de otros estudios.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil vertical de una turbera.....	6
Figura 2. Estadios de desarrollo de una turbera según Moore & Bellamy (1974)	7
Figura 3. Diferencia principal entre turbera ombrotónica (bog) y turbera minerotónica (fen).....	8
Figura 4. Ejemplo de terrestización y paludificación.....	9
Figura 5. Relación entre términos y conceptos adoptados.....	10
Figura 6. Extensión aproximada de las turberas a nivel mundial.....	12
Figura 7. Contribuciones humanas a la pérdida de turberas.....	14
Figura 8. Carbono contenido en las turberas del mundo comparado con otros reservorios terrestres...20	
Figura 9. Ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica.....	22
Figura 10. Especificaciones técnicas de SENTINEL-2.....	23
Figura 11. Distribución espacial de las parcelas de estudio en las turberas de Talamanca, Costa Rica..27	
Figura 12. Distribución espacial de las cámaras estáticas dentro de cada turbera elegida, Talamanca, Costa Rica.....	30
Figura 13. Imagen de las cámaras elaboradas. A. Visualización externa de la cámara. B. Conexiones internas.....	31
Figura 14. Mapa final de la ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica.	32
Figura 15. A. Torre de alta tensión del Instituto Costarricense de Electricidad construida dentro de la turbera 3 de Junio. B. Estanque elaborado en la turbera 3 de Junio.....	35
Figura 16. Turbera afectada por la tormenta Nate, mes del 2018, cordillera de Talamanca, Costas Rica.....	35
Figura 17. A. Helecho <i>Blechnum chiriquanum</i> presente en la turbera km 62. B. <i>Chusquea sp.</i> presente en la turbera Los Quetzales, cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	36
Figura 18. Imágenes de musgo pardo (der) y ciperáceas (izq) en las turberas muestreadas en la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	38
Figura 19. Nivel freático en las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	39
Figura 20. Profundidad máxima en las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	39
Figura 21. Imagen del perfil de la turbera 12, el área naranja es piedra con arcilla endurecida. Cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	40
Figura 22. Almacenamiento de carbono (Mg ha ⁻¹) a través de perfiles de suelos evaluados en la cordillera de Talamanca, Costa Rica.....	40
Figura 23. Flujo promedio de GEI en las turberas de la cordillera de Talamanca (kg ha ⁻¹ día ⁻¹).....	43

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

Acrónimos

SIGLAS	
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IMCG	International Mire Conservation Group / Grupo Internacional de Conservación de Turberas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change / Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
IPS	International Peatland Society / Sociedad de Turberas Internacional
SNH	Scottish Natural Heritage
RADAR	RADAR - Radio Dectection and Ranging
LiDAR	Detección y medición de distancias por luz
REM	Radiación Electromagnética
EMM	Espectro Electromagnético
DOC	Carbono Orgánico Disuelto
PPN	Productividad Primaria Neta
Abreviaturas	
CO₂	Dióxido de Carbono
CO₂ eq	Dióxido de Carbono equivalente
CH₄	Metano
N₂O	Óxido nitroso
Unidades	
cm	Centímetros
g	Gramos
Gt	Gigatonelada
ha	Hectáreas
m	Metros
m³	Metros cúbicos
Pg	Pentagramos

RESUMEN

La investigación se realizó en las turberas ubicadas en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Se elaboraron productos cartográficos para identificar espacialmente las turberas, su extensión y número; además se realizó una descripción científica del entorno tales como descripciones de propiedades biofísicas, tales como, pH, nivel freático, profundidad máxima y análisis florístico. Adicionalmente, se inició con una nueva línea de investigación para el país, la cual caracterizará la capacidad de almacenamiento de carbono en suelos anegados y su intercambio gaseoso con la atmósfera.

Según los datos espaciales se estima que el área de estudio cuenta con una extensión de 89 182 ha de las cuales el 82% está cubierto de bosque, seguido de un 12% de pastos. Se logró estimar que la cobertura por turberas en el área de estudio cuenta con una extensión de 1322 ha, equivalentes a un 1,3% de la superficie total de la zona.

Las turberas ubicadas en el área estudio, según se puede observar, están rodeadas por parches de bosques, pero pese a su presencia, se encontró que las principales turberas consideradas en el estudio están amenazadas por prácticas agrícolas, presencia de ganado, la construcción de torres de alta tensión por el Instituto Costarricense de Electricidad e instalación de criaderos de truchas o estanques recientes.

El análisis florístico determinó que las cinco especies con los mayores índices de valor de importancia ecológica del área de estudio son: *Blechnum chiriquanum*, *Chusquea* sp., *Pteridium aquilinum*, *Zanthoxylum melanostictum* y *Pteridium arachnoideum*. Las especies menos abundantes en el área de estudio fueron *Hymenophyllum* sp., *Myrsine* sp., *Agrostis toluensis*, *Carex donnell-smithii* y *Macleania insignis*. Estas especies tienden a ser más sensibles a las perturbaciones ambientales, es decir, identificar un cambio en la diversidad ya sea en el número de especies, en la distribución de la abundancia o dominancia y alertar sobre procesos empobrecedores.

Los datos de pH mostraron un promedio mínimo de 6,6 y máximo de 7,5, esto demuestra que las turberas de Costa Rica pueden ser clasificadas como, "turberas minerotróficas".

Los resultados de nivel freático demuestran que las turberas de Costa Rica pasan con un espejo de agua a pesar de las estaciones o fluctuaciones del clima. La presencia de agua ocurre aproximadamente entre 5 a 6 cm de profundidad, dando como resultado agua en la superficie de la turbera. Esto es considerado como una condición favorable para el ecosistema debido a que regula el crecimiento de

especies no adaptadas para este ambiente, dando como resultado la imposibilidad de especies invasoras dentro de la misma

Los análisis de modelos lineales y mixtos demostraron que el carbono muestra una relación directa con los perfiles del suelo (15 cm, 30 cm y 50 cm). Se observa un aumento conforme se va avanzando en la profundidad del perfil. Aproximadamente, entre el perfil 15 y 30 cm, se da un aumento de 274,84 Mg ha⁻¹ y entre el perfil 30 cm y 50 cm de 101,67 Mg ha⁻¹

Las turberas de la cordillera de Talamanca analizadas en el estudio almacenan aproximadamente un 31-43% de carbono en sus primeros 50 cm de suelo, mientras que turberas de Indonesia almacenan entre un 55% - 56% en los primeros 20 cm de profundidad; por lo que se podría indicar que las 11 turberas analizadas en este estudio almacenan una cantidad de carbono importante que no está siendo emitido a la atmósfera.

Esta característica de almacenar grandes cantidades de carbono se puede explicar debido a las condiciones presentes en los trópicos tales como: lluvias frecuentes y excesivas, altas precipitaciones y evapotranspiración restringida (entornos montañosos o alpinos, grandes cuencas de captación y retención regular de agua, depresiones del terreno y llanuras de inundación).

En cuanto a los análisis de gases, el metano muestra emisiones mayores debido a que el metano en una turbera está en función de la producción, consumo del perfil, transporte a la atmósfera como difusión o ebullición. Además, la formación de metano está restringida a la parte anóxica del perfil, seguida de la posición real de la mesa de agua.

En el caso del dióxido de carbono, las emisiones dependen del momento del día; además, la emisión de este gas en una turbera incluye respiración autotrófica, regulada por fotosíntesis y temperatura, y respiración heterotrófica, controlada en gran medida por la temperatura del suelo.

Por ende, se podría deducir que las turberas de Costa Rica presentan sistemas anaeróbicos que fomentan la producción de metano, ya que la turba y la vegetación como musgos fijadores de CO₂ se encuentra cubierto por un nivel freático.

ABSTRACT

The research was conducted in the peat bogs located in the Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Cartographic products were developed to spatially identify peatlands, their extension and number; In addition, a scientific description of the environment was carried out, such as descriptions of biophysical properties, such as pH, phreatic level, maximum depth and floristic analysis. Additionally, it began with a new research line for the country, which will characterize the storage capacity of carbon in flooded soil and its gas exchange with the atmosphere.

According to the spatial data it is estimated that the study area has an area of 89 182 ha of which 82% is covered with forest, followed by 12% of pastures. It was possible to estimate that the coverage by peatlands in the study area has an extension of 1322 ha, equivalent to 1.3% of the total area of the area.

The peat bogs located in the study area, as can be seen, are surrounded by forest patches, but despite their presence, it was found that the main peat bogs considered in the study are threatened by agricultural practices, the presence of livestock, the construction of towers of high voltage by the Costa Rican Institute of Electricity and

installation of trout hatcheries or recent ponds.

The floristic analysis determined that the five species with the highest value indexes of ecological importance of the study area are: *Blechnum chiriquanum*, *Chusquea sp.*, *Pteridium aquilinum*, *Zanthoxylum melanostictum* and *Pteridium arachnoideum*.

The less abundant species in the study area were *Hymenophyllum sp.*, *Myrsine sp.*, *Agrostis toluensis*, *Carex donnell-smithii* and *Macleania insignis*. These species tend to be more sensitive to environmental disturbances, that is, to identify a change in diversity either in the number of species, in the distribution of abundance or dominance, and to alert about impoverishing processes.

The pH data showed a minimum average of 6.6 and maximum of 7.5, this shows that the peat bogs of Costa Rica can be classified as "minerotrophic peat bogs".

The results of the water table show that the peat bogs of Costa Rica pass through a mirror of water despite the seasons or fluctuations of the climate. The presence of water occurs approximately between 5 to 6 cm deep, resulting in water on the surface of the peat bog. This is considered a favorable condition for the ecosystem because it regulates the growth of species not adapted to this environment, resulting in the impossibility of invasive species within it

Analysis of linear and mixed models showed that carbon shows a direct relationship with soil profiles (15 cm, 30 cm and 50 cm). An increase is observed as the depth of the profile is advanced.

Approximately, between the profile 15 and 30 cm, there is an increase of 274.84 Mg ha⁻¹ and between the profile 30 cm and 50 cm of 101.67 Mg ha⁻¹

The peat bogs of the Talamanca mountain range analyzed in the study store approximately 31-43% of carbon in their first 50 cm of soil, while Indonesian peat bogs store between 55% - 56% in the first 20 cm of depth; so it could be indicated that the 11 peatlands analyzed in this study store a significant amount of carbon that is not being emitted into the atmosphere.

This characteristic of storing large amounts of carbon can be explained due to the conditions present in the tropics such as: frequent and excessive rains, high rainfall and restricted evapotranspiration (mountainous or alpine environments, large basins of catchment and regular water retention, depressions of the terrain and flood plains).

In terms of gas analyzes, methane shows higher emissions because methane in a peat bog is a function of production, consumption of the profile, transport to the atmosphere as diffusion or boiling. In addition, the formation of methane is restricted to the anoxic part of the profile, followed by the actual position of the water table.

In the case of carbon dioxide, emissions depend on the time of day; In addition, the emission of this gas in a peat bog includes autotrophic respiration, regulated by photosynthesis and temperature, and heterotrophic respiration, largely controlled by the temperature of the soil.

Therefore, it could be deduced that the peat bogs of Costa Rica present anaerobic systems that promote the production of methane, since the peat and the vegetation like mosses fixing CO₂ is covered by a phreatic level.

1. Introducción

Según la Convención Ramsar, los humedales son: “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Secretaría de la Convención de Ramsar 2013). La definición expresa un criterio amplio para que cada Estado que participe de la convención disponga de su uso a nivel nacional (Moss 2006, Secretaría de la Convención de Ramsar 2013). Se reconocen cinco tipos de humedales: marinos (humedales costeros), estuarinos (deltas, marismas y manglares), lacustres (asociados a lagos), ribereños (asociados a ríos), palustres (pantanos, turberas o ciénagas) (Secretaría de la Convención de Ramsar 2013).

Dentro de los humedales palustres no existe una definición universal de turbera, pero el IPCC (2014) incluyó el concepto de turba en la categoría de “tierra con suelo orgánico” e identificó a los suelos orgánicos como histosoles (Soil Survey Staff, 1999). Las turberas son ecosistemas húmedos formados por turba y que poseen una vegetación formadora de la misma (Castillo et al. 2001 y Roig y Roig 2009). En su definición más simple, estos son ecosistemas en los cuales la producción primaria neta (PPN) excede la descomposición de la materia orgánica. Esta descomposición es muy lenta debido a la serie de condiciones y restricciones propias de estos ambientes, tales como: acidez del agua y suelo, humedad, anegamiento constante (altos niveles freáticos), bajas concentraciones de nutrientes, anoxia (baja concentración de oxígeno), bajas temperaturas y sustratos poco lábiles (Moore *et al.* 2006). Estas condiciones provocan que el mismo ecosistema formador de turba sea un depósito rico de materia orgánica en proceso de descomposición (Parish *et al.* 2008).

Las turberas representan entre el 50% – 70% de los humedales de todo el mundo (Secretaría de la Convención de Ramsar 2013); cubren un aproximado de 400 millones de ha, equivalentes a un 3% de la superficie terrestre (Joosten 2009) en 180 países (Parish *et al.* 2008). Se concentran mayormente en las zonas frías del hemisferio norte, aunque se ha visto una gran presencia de las mismas en trópicos, con una extensión aproximada de 30-45 millones de ha (Rieley *et al.* 2008). Estos ecosistemas proporcionan un sinfín de funciones importantes y servicios ecosistémicos (Kimmel y Mander 2010, Domínguez y Vega-Valdés 2015): la regulación del agua, conservación de biodiversidad y secuestro y almacenamiento de carbono (Holden 2005, Gorham 1991, Parish *et al.* 2008, Minayeva y Sirin 2012, Lindsay *et al.* 1988). Desde su formación a partir del Holoceno (Roulet *et al.* 2007, Yu 2011), estos

ecosistemas han acumulado grandes cantidades de carbono en forma de materia orgánica poco descompuesta y, en la actualidad, son los reservorios terrestres con mayor carbono almacenado: entre 500 y 600 Gt en forma de turba (Gorham 1991, Joosten 2009, Yu 2011) en solo el 3% de la superficie terrestre del planeta (Joosten 2009). Esto representa tanto carbono como toda la biomasa de los ecosistemas terrestres, dos veces más que el almacenado en los bosques, y casi la misma cantidad de carbono que se encuentra en la atmósfera (Rieley *et al.* 2008, Parish *et al.* 2008, Díaz *et al.* 2015).

Debido a la alta capacidad de almacenamiento de carbono y al ser ecosistemas vulnerables a alteraciones debido a los impulsores de cambio climático, las turberas se pueden convertir en fuentes netas de gases efecto invernadero (GEI; Joosten 2015, Hoyos-Santillan *et al.* 2016) debido a los usos humanos que sufren: prácticas agrícolas, infraestructuras, drenado, establecimiento de parques eólicos, vías de acceso, forestación, extracción de turba y contaminación atmosférica (Marsden y Ebmeier 2012). Los suelos orgánicos son el tercer emisor de GEI en el sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés); emiten casi una gigatonelada de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2 \text{ eq}$), lo que representa un 10% de las emisiones del sector AFOLU (IPCC 2014). Debido a estas razones, muchas agencias nacionales y regionales están tratando de proteger, conservar y restaurar las turberas degradadas para conservar las existencias de carbono presentes en estos ecosistemas y no emitir más GEI y así poder reducir los efectos del cambio climático.

Costa Rica presenta 26 humedales en las tierras altas, donde un tercio corresponde a turberas. Estas son de origen glaciar debido a la colmatación de sedimentos con poco o nada de drenaje, lo que provoca una acumulación de agua en condiciones anaeróbicas. Además, las bajas temperaturas hacen que los organismos descomponedores actúen lentamente, permitiendo que se acumule la materia orgánica (Iturraspe 2010, Domínguez *et al.* 2012, Domínguez y Vega-Valdés 2015). En Costa Rica no existe una valoración explícita de los humedales de altura; las investigaciones relacionadas a turberas son escasas, a pesar de que están protegidas bajo el Convenio Ramsar. Las únicas investigaciones realizadas en estos ecosistemas han sido las de Brak *et al.* (1902), quienes describieron las comunidades vegetales de la turbera centroamericana más grande (La Chonta); Castro (2005), quien realizó una pequeña descripción de esta turbera, y Sánchez (2004), quien fue el encargado de actualizar las fichas RAMSAR de este humedal.

En respuesta a estos vacíos de conocimiento, se elaboraron productos cartográficos para identificar espacialmente las turberas, su extensión y número; además se realizó una descripción científica del entorno tales como descripciones de propiedades funcionales además de variables abióticas del sitio. Adicionalmente, se inició con una nueva línea de investigación para el país, la cual caracterizará la

capacidad de almacenamiento de carbono en suelos anegados y su intercambio gaseoso con la atmósfera. Con la información generada durante la investigación se espera crear conciencia de la existencia e importancia de las turberas. Esta investigación promoverá los estudios en el ecosistema a nivel nacional e internacional y la promoción de la conservación y monitoreo de estos ecosistemas como opciones para mitigar el cambio climático.

2. Objetivos y preguntas de investigación

En esta sección se expondrá los objetivos que busca esta investigación en cuanto a cubrir los vacíos de información ecosistémica y científica:

2.1. Objetivo general

Cuantificar el potencial de las turberas de las zonas de páramo del sur de Costa Rica para la mitigación del cambio climático.

2.2. Objetivos específicos y preguntas de investigación

Cuadro 1. Objetivos específicos y sus respectivas preguntas de investigación

Objetivos específicos	Preguntas de investigación
Obj 1. Determinar la extensión y ubicación de las turberas y otros usos del suelo en el área de estudio.	1. ¿Cuál es la distribución espacial de las turberas? 2. ¿Cuál es la extensión de las turberas identificadas?
Obj 2. Cuantificar las existencias de carbono almacenado y explicar la variación espacial de la cantidad de carbono almacenado en términos de variables abióticas.	1. ¿Cuánto carbono almacenado tienen las turberas de Talamanca? 2. ¿Cómo afectan las condiciones abióticas del ecosistema el almacenamiento de carbono?
Obj 3. Cuantificar el intercambio gaseoso de los gases de efecto invernadero en los suelos de las turberas.	1. ¿Son las turberas sumideros o fuentes de emisión de GEI?

3. Síntesis referencial

3.1. Terminología y conceptos adoptados

Las turberas tienen diversas formas, características y usos que explican su geografía y su composición ecológica. Son generalmente definidas como un sistema que presenta una capa de turba acumulada naturalmente en su superficie. Por eso es importante distinguir entre una turba y turbera (Kunkle *et al.* 2014).

3.1.1. Turba

Turba – *peat*, en inglés- se define como el material en el suelo que contenga al menos un 30% de materia orgánica muerta (Joosten et al. 2002). Otra definición, según Roig y Roig (2004), incluye la acumulación de materia orgánica que no ha sido transportada o movida después de su muerte. La cantidad de materia orgánica que debe poseer dicha acumulación puede variar entre 5% y más de 50%; medido en peso seco. Para que exista una formación de turba se deben formar entradas de materia orgánica vegetal muerta en la capa superior del suelo. Para que este proceso se de, el sitio debe de presentar un alto nivel freático cerca de la superficie del suelo. En el caso de que no se presente inundación, nivel de agua, se debe determinar que el suelo presente una saturación de humedad de un 95%. Bajo estas condiciones, la saturación del agua sobre el suelo y la falta de oxígeno limitan la descomposición de la materia orgánica, pero se logra mantener la producción de biomasa por medio de la vegetación adaptada a estas condiciones (Kunkle *et al.* 2014).

3.1.2. Turbera

Turberal -*peatland* en inglés- o turbera corresponde a ecosistemas con capacidad para acumular y almacenar turba, derivada de plantas adaptadas para vivir en condiciones de saturación permanente, con cantidades de oxígeno reducidas y escasa disponibilidad de nutrientes (Lappalainen 1996). Según (Roig y Roig 2009), las turberas, corresponden a las áreas donde la turba está siendo producida y acumulada progresivamente, incrementando la potencia del depósito orgánico. El espesor de la turba puede variar, pero debe de ser siempre mayor a 50 cm.

A pesar de las definiciones existentes para “turbera”, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), no tiene una definición formal para la misma, pero sí incluyen el concepto de turbera en la categoría de tierra con suelo orgánico (IPCC 2014). Además, la Sociedad Internacional de Turberas (IPS, por su sigla en inglés) y el Grupo Internacional de Conservación de Turberas (IMCG, por su sigla en inglés), utilizan el término turbera para describir un área con una acumulación natural de turba sobre la superficie del suelo. En su terminología, “lodo” es una de las

formas de describir la turbera en estado activo mediante la formación y acumulación de la turba (Joosten *et al.* 2002)

Estas definiciones aún no están universalmente aceptadas; varían regionalmente al igual que sus traducciones del inglés. Debido a esto, los sistemas de clasificación son diferentes en cada país, pero en su mayoría cubren la cubierta vegetal, uso del suelo, características de formación, hidrología y geoquímica. Al considerar todas estas variables, es evidente que las turberas son un bioma que se encuentra en todas las zonas climáticas, así que pueden presentar vegetación diferente, geoquímica y características hidrológicas según su sitio (Runkle y Kutzbach 2014).

En el caso de Costa Rica se ha definido como turbera la *Zona de turba ácida, formada de materia vegetal parcialmente descompuesta en áreas musgosas e inundadas* (INBio 2010). Definición que se utilizará durante la investigación.

3.2. Formación

En el perfil vertical de una turbera se pueden distinguir dos niveles: uno superficial conocido como acrotelmo y otro profundo conocido como catotelmo (Castillo *et al.* 2001) (Figura 1). El acrotelmo está formado por un nivel de escaso espesor que raramente supera los 30-40 cm de turba. En este, el nivel del flujo de agua es más rápido que en el catotelmo y la disponibilidad de oxígeno es mayor debido a que contiene la vegetación viva. El catotelmo está formado por la acumulación de vegetación o materia muerta que le da forma a la turbera. Aquí los procesos hidrológicos son muy lentos y la disponibilidad de oxígeno es baja (Castillo *et al.* 2001).

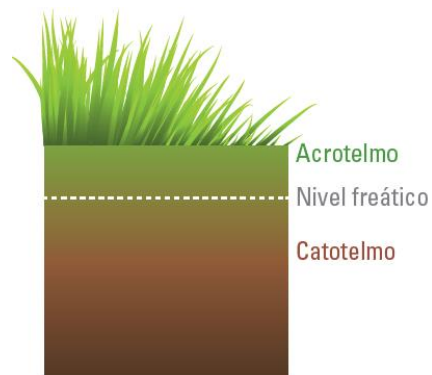


Figura 1. Perfil vertical de una turbera. Fuente: Domínguez y Vega-Valdés (2015).

Según Moore y Knowles (1989) la formación de una turbera se puede explicar en cinco estadios (Figura 2):

Estadio 1: Este se puede dividir en dos procesos: primero existe un importante flujo de aguas que aporta sedimentos de los alrededores, generando un bajo nivel de producción de turba, densa y

profunda debido a la alta oxigenación. En el segundo proceso se encuentran flujos reducidos de agua y poca sedimentación de los ambientes aledaños que generan así una formación elevada de turba, donde el agua fluye bajo el material.

Estadio 2: Se da una acumulación de turba que se tiende a canalizar en el flujo principal de aguas adentro de la turba, dejando durante períodos de flujos de aguas excesivos ciertas zonas a los efectos del movimiento del agua subterránea.

Estadio 3: Se da un crecimiento vertical y horizontal del cuerpo de turba lo cual produce que la mayor parte de la cubeta original quede fuera de la influencia de las aguas superficiales. Se ve restringido el acceso de agua por lo que sus flujos empiezan a depender en su mayor parte de las precipitaciones directas. Se pueden observar algunas zonas de la turbera con flujo de aguas lento y continuo.

Estadio 4: Se da un crecimiento continuo del cuerpo de la turba. Se dan pequeñas inundaciones como resultado de la elevación del nivel del agua subterránea como resultado de grandes precipitaciones.

Estadio 5: Se puede observar que la superficie se eleva y adquiere la forma de domo, de manera tal que no lo afectan las fluctuaciones estacionales del nivel de aguas subterráneas.

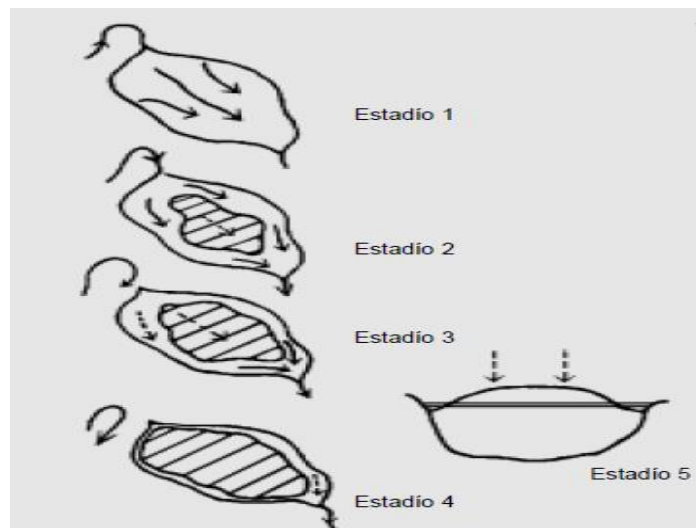


Figura 2. Estadios de desarrollo de una turbera según Moore & Bellamy (1974)

3.2.1 Tipología de turberas

Las turberas se clasifican según el origen de los turbales y su hidrología. A continuación, se describen las características de las principales clases de turberas bajo estas clasificaciones.

3.2.1.1 Tipología según turbales

Según Crum (1998), las turberas se pueden dividir según el origen de los turbales que la formen (Figura 3), que explica la principal diferencia entre las turberas por la captación del agua:

Turbera ombrotrófica -*bog* en inglés: son aquellas turberas cuya única fuente de nutrientes corresponde a la atmósfera y no posee ninguna vinculación con aporte de aguas subterráneas. Por lo tanto, la única fuente de nutrientes para este tipo de turbera es la precipitación.

Turbera minerotrófica -*fen* en inglés: son las turberas que poseen aportes de aguas superficiales, subterráneas o ambas. Pueden ser eutróficas, aquellas que poseen altos niveles de nutrientes, especialmente calcio y con un pH entre 6 y 7; oligotróficas, aquellas que tienen baja disponibilidad de nutrientes y presentan un pH entre 3 y 4; y por último están las mesotróficas, aquellas que presentan condiciones intermedias entre los dos tipos anteriores. Estas tienden a contener nutrientes en concentraciones altas para la aparición de especies vegetales (Sjörs 1950).

Turberas de transición o elevadas -*peatfen* en inglés: Son aquellas que poseen características compartidas; pueden tener aportes de agua por medio de precipitación o aguas subterráneas.

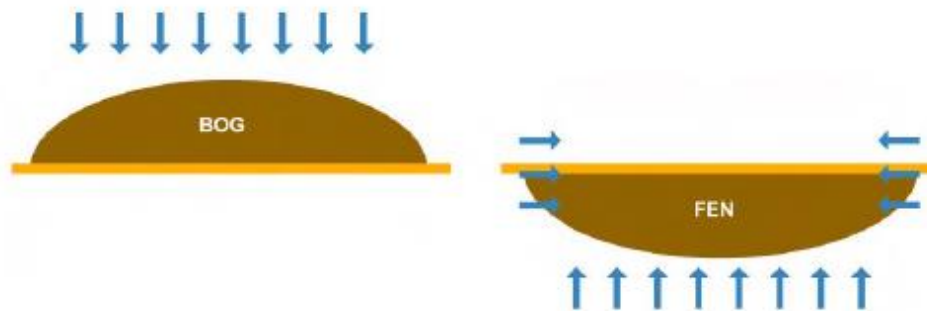


Figura 3. Diferencia principal entre turbera ombrotrófica (*bog*) y turbera minerotrófica (*fen*).

Fuente: Parish *et al.* (2008)

Sjörs (1983) hace una secuencia del proceso de formación de turberas ombrotróficas y minerotróficas. Esta formación se divide en dos vías principales, que son la terrestización y la paludificación (Figura 4).

La terrestización es el resultado de la colmatación de un medio acuático (lago, laguna o valle fluvial) que ocupa una zona deprimida del terreno que por medio de la invasión de vegetación desde los márgenes producen una turba minerotrófica. Por otro lado, la paludificación consiste en la formación de la turbera directamente en una superficie mineral plana o convexa; se desarrollan en una cavidad

bien definida. Bajo esta característica se acumulan restos orgánicos, adquiriendo un espesor crítico que imposibilita a la vegetación enraizar en el suelo mineral subyacente, perdiendo contacto directo con el nivel freático. Este proceso provoca que la turbera logre elevarse sobre el terreno y que su alimentación pase a depender exclusivamente de la lluvia, creando así una turbera ombrotrofica sobre una minerotrofica. Este proceso da como resultado las turberas elevadas.



Figura 4. Ejemplo de terrestriización y paludificación. Fuente: Domínguez y Vega-Valdés (2015) adaptado de Joosten (2008)

Para que se inicie un proceso de formación de turbera debe de existir primero un ecosistema tipo turbal. A partir de ahí se inician los procesos de formación y, dependiendo de cuál sea su principal fuente de agua, se puede clasificar (Figura 5; Roig y Roig 2004):

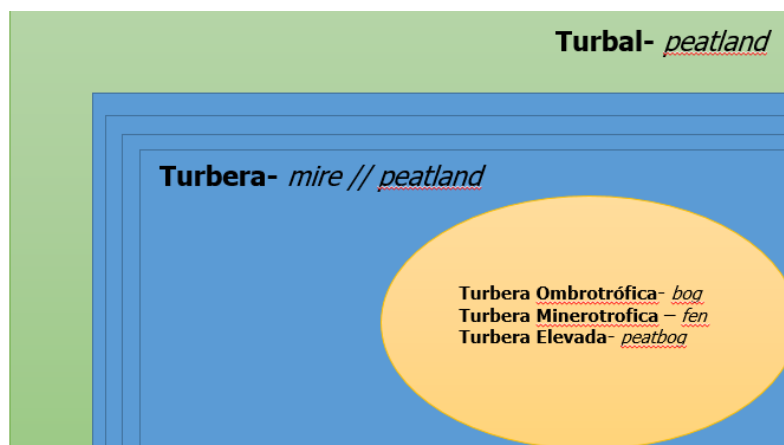


Figura 5. Relación entre términos y conceptos adoptados. Fuente: Adaptada de Crum 1998 y Joosten 2000.

3.2.1.2 Tipología hidrogenética

Autores como Roig y Roig (2004) y Joosten *et al.* (2002), han establecido una clasificación de las turberas según los flujos de agua. Las fluctuaciones de los niveles del agua influyen en la tasa de

transferencia y solubilidad de las sustancias químicas (nutrientes, contaminantes, gases, etc.) y, por ende, en la vegetación y en la composición de la turba, por lo que la capacidad de almacenamiento de la misma tiende a verse afectada.

Las turberas sin flujo de agua horizontal son aquellas donde el movimiento del agua es principalmente vertical y prevalecen los cambios en los coeficientes de almacenamiento de nutrientes. Todas estas turberas se pueden decir que son "pasivas", se encuentra horizontalmente en el paisaje; se llenan gradualmente de turba, pero afectan la hidrología por sus desagües.

A su vez, estas turberas se clasifican en dos categorías (turberas con ascenso de agua y turberas de inundación); esta última se subdivide en tres subcategorías:

Turberas con ascenso de agua: Se da cuando el nivel del agua subterránea se encuentra ligeramente por encima de la superficie seca del suelo. Estos incrementos pueden ser causados por un incremento en el abastecimiento del agua o una disminución en el escurrimiento.

Turberas de inundación: Se forman en las zonas que son inundadas periódicamente por ríos, lagos o mares. Aquellas con un espesor de turba significativa, mayor a 30%, solo existen bajo condiciones de un continuo aumento del nivel del agua. Son turberas que se pueden relacionar con las turberas elevadas, pero se diferencia por la acción mecánica del flujo periódico lateral y la sedimentación asociada de arcillas o arenas.

Las turberas con un flujo de agua horizontal sustancial presentan una característica de flujo de agua que se comporta de manera diferente y se ven afectadas según la vegetación o turba presente en la misma. La vegetación crece y la acumulación de turba puede provocar un ascenso del nivel del agua subterránea y frecuentemente también en área de desagües. Existen tres tipos de turberas bajo este flujo:

Turberas de percolación: Estas se encuentran ubicadas en paisajes donde hay un flujo constante de agua durante el año. El material que conforma la turba alcanza la zona anegada por lo cual se produce una descomposición aeróbica en corto tiempo, provocando que esta sea débil y elástica. A causa de la cantidad de agua, se produce escurrimiento sustancial a través del conjunto de la turba.

Turberas de escurrimiento: Se forman cuando el nivel del agua cae periódicamente, provocando que el oxígeno penetre en la turba. Lo anterior provoca que se acelere la descomposición de la turba, obligando a que el nivel de agua aumente e inunde la turba. Estas turberas se encuentran generalmente en sitios donde el abastecimiento de agua es casi continuo o las tasas de evapotranspiración son bajas. Se pueden presentar en zonas con pendiente debido al conjunto de conductividad hidráulica y a los grandes aportes del agua.

Turberas de acrotelmo: Logran acumular una gran cantidad de material orgánico con poca descomposición, por lo que poseen una gran capacidad de almacenamiento de turba. El material antiguo ubicado en las zonas más profundas de la turba tiende a oxidarse, desarrollando en la capa superior de la turba un gradiente distinto en la conductividad hidráulica. El almacenamiento de agua cae a un nivel menor de permeabilidad y el escurrimiento es retardado. En estas zonas la evapotranspiración produce pérdida de agua, pero el gran coeficiente de almacenamiento de la turba que presenta alta porosidad produce que el nivel del agua se pierda en pequeña magnitud. Considerando estas características, las capas de turba profundas están continuamente saturadas a pesar de cambios en las fluctuaciones del abastecimiento de agua. Estas turberas son las únicas elevadas que han sido identificadas universalmente. Debido a todas estas propiedades solo especies muy características del género *Sphagnum* pueden sobrevivir bajo estas condiciones. Las turberas naturales son ecosistemas complejos con características ecológicas que no se logran encontrar en otros paisajes ya que incluyen rasgos como el sistema autorregulado hidrológico, mecanismos de retención de agua producidas a través de cambios en la transmisividad hidrológica del suelo y restricciones naturales para la evapotranspiración (Parish *et al.* 2008, Minayeva y Sirin 2012). Además las turberas se caracterizan por su alta fragilidad y por la poca o lenta capacidad de recuperación ante las perturbaciones, principalmente al drenaje de las mismas (Marsden y Ebmeier 2012). También presentan gran potencial de almacenar carbono porque sus suelos orgánicos pueden presentar profundidades de hasta 6 a 10 m (Marsden y Ebmeier 2012).

3.3. Importancia de las turberas

Las turberas naturales son ecosistemas complejos con características ecológicas que no se logran encontrar en otros paisajes ya que incluyen rasgos con el sistema autorregulado hidrológico, mecanismos de retención de agua producidas a través de cambios en la transmisividad hidrológica del suelo y restricciones naturales para la evapotranspiración (Parish *et al.* 2008, Minayeva y Sirin 2012). Las turberas presentan dos características: en primer lugar, su alta fragilidad por la poca o lenta capacidad de recuperación ante las perturbaciones, principalmente su drenaje (Marsden y Ebmeier 2012). Además, su gran potencial de almacenar carbono porque sus suelos orgánicos pueden presentar profundidades de 6 a 10 m (Marsden y Ebmeier 2012).

Entre sus principales funciones ecológicas, las turberas prestan servicios ecosistémicos, proporcionan refugios para vida silvestre y secuestran carbono por un tiempo prolongado debido a la lenta descomposición dentro de la turba. Entre los servicios ecosistémicos que pueden proveer está el suministro de productos importantes como cultivos, bayas, madera, fibra, además de ganado y agua purificada o agua dulce (Kimmel y Mander 2010).

3.4. Distribución mundial y en Costa Rica

Las turberas cubren un área aproximada de 400 millones de hectáreas (ha); alrededor de un 3% - 4% de la superficie terrestre (Joosten 2009). El 88% de las turberas se encuentran el hemisferio norte, cubriendo grandes áreas de Norteamérica, Rusia y Europa (Figura 6) (IPS 2008).

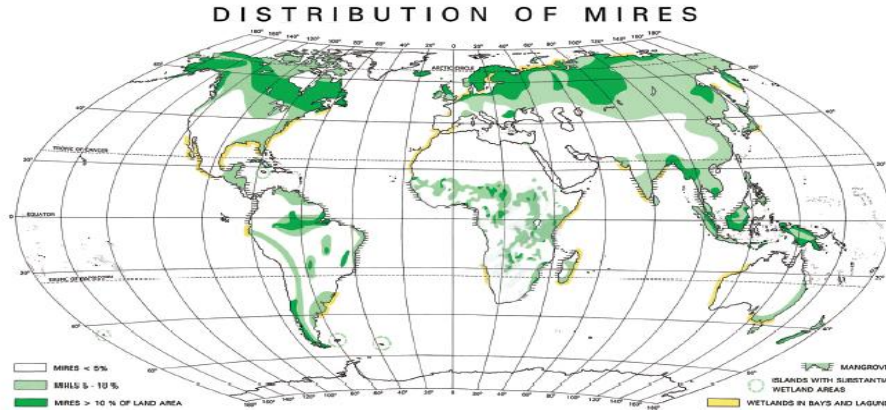


Figura 6. Extensión aproximada de las turberas a nivel mundial. Disponible en <http://peatlands.org/>

Las turberas tropicales se encuentran principalmente en el este y sureste de Asia, el Caribe y Centroamérica y el en sur y suroeste de África. Se estima que las turberas de los trópicos tienen una extensión aproximada de entre 30-45 millones de hectáreas (Cuadro 2), lo cual representa un 10%-12% del total de turberas a nivel global. Dado que la mayoría de las turberas se encuentran en sitios de baja elevación y en la costa, es probable que se desarrollaran a un ritmo más rápido que las turberas que se encuentran en las zonas templadas y boreales (Rieley *et al.* 2008).

Cuadro 2. Extensión global aproximada de las turberas en el trópico

Región	Área (media) (10⁶ ha)	Área (tango) (10⁶ ha)
Centroamérica	2437	2276-2599
Suramérica	4037	4037
África	2995	2995
Asia continental	2100	1100 – 3100
Sureste de Asia	26 216	20 205 – 33 211
Pacífico	0,019	0,019
TOTAL	37.804	30 632 – 45 961

Fuente: Tomado de Rieley *et al.* (2008), basado en Immirzi y Maltby (1992); Rieley *et al.* (1996)

Una extensiva búsqueda de información sobre las turberas centroamericanas, nos reveló la existencia de grandes vacíos de información; no se encontraron documentos o publicaciones relacionadas. Esto refuerza el valor o importancia de esta investigación debido a la falta de conocimiento científica de las turberas en las zonas del trópico centroamericano.

3.4.1. Turberas de Costa Rica

Costa Rica presenta 26 humedales en las tierras altas, donde el tercio de los mismos corresponden a turberas ubicadas en el páramo, específicamente en la Cordillera de Talamanca en sitios como el Parque Nacional Chirripó, el Cerro de la Muerte, Reserva Forestal Los Santos y el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte.

La zona presenta gran heterogeneidad en cuanto al ecosistema, por lo que se ha desarrollado un gran número de asociaciones vegetales como las turberas y los páramos, típicos de ambientes andinos. El sitio en general presenta altitudes desde los 700 hasta los 3491 msnm, pero las turberas aparecen desde los 2600 hasta los 3290 msnm. El área total presenta una extensión aproximada de 192 520 ha (Sánchez 2004).

En esta zona, el clima y la temperatura son muy variados e impredecibles; dependen especialmente de la altitud y de la vertiente. Aunque es muy húmedo en los meses de mayo a diciembre, se torna muy seco y soleado en los meses de enero a abril. La nubosidad es frecuente en las tierras altas, lo cual contribuye a la temperatura ambiental más baja, alta humedad relativa, abundancia de condensación y frecuentes lloviznas. En las zonas más altas se han registrado hasta 9°C bajo cero y en las zonas medias se han registrado promedios de 12°C a 22°C (Sánchez 2014).

Las turberas presentes en estas zonas son de origen glacial. La zona presenta áreas planas y cóncavas que han propiciado la formación de turberas favorecidas por los aportes traídos por la humedad y precipitación de los vientos húmedos tanto del Caribe como del Pacífico (Lachniet y Seltzer 2002).

Las turberas a nivel nacional tienen una gran importancia dado que poseen una alta productividad y son sitios de recarga acuífera, y albergan una gran cantidad de plantas y animales con adaptaciones para resistir las condiciones climáticas de la zona, además de ser un sitio Ramsar para el país desde el 2003 (Sánchez 2014).

3.5. Amenazas globales para las turberas

Al ser ecosistemas únicos y con alta fragilidad sufren amenazas de varios tipos, pero principalmente por el cambio de uso de la tierra. El exceso de prácticas agrícolas, drenado, contaminación atmosférica, forestación, extracción de turba o minerales, establecimiento de parques eólicos y vías de acceso son fuertes amenazas para las turberas (Figura 7; Marsden y Ebmeier (2012), Parish *et al.* (2008)). Los daños varían según su intensidad, provocando de forma general una disminución lenta de los niveles de agua. Los cambios en el nivel de agua pueden no tener efecto varios años después, generando la eliminación de la capa de turba con una erosión excesiva en el suelo desnudo. Se ha observado que aún una turbera abandonada o en estado de regeneración continuará generando emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera aproximadamente entre 10 y 30 años (Marsden y Ebmeier 2012, Natural England 2007).

CONTRIBUCIONES HUMANAS A LA PÉRDIDA DE TURBERAS

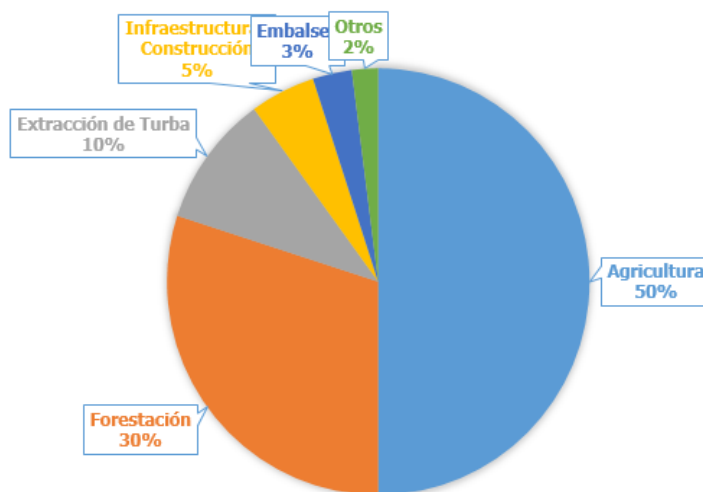


Figura 7. Contribuciones humanas a la pérdida de turberas. Fuente: Modificado de Joosten y Clark (2002).

3.5.1. Prácticas agrícolas

1. Pastoreo

Los efectos del pastoreo sobre la biodiversidad de las turberas son complejos y altamente asociados a las características ambientales y ecosistémicas locales (Marsden y Ebmeier 2012). Los impactos inmediatos provocados por esta actividad se reflejan en daños físicos a la vegetación y a la superficie, generados por el pisoteo, pastoreo, orina y heces de los animales (Stark y Yläne 2015 y Morris *et al.* 2013) Además, estos incluyen la creación de pequeñas áreas de superficie de turba desnuda que pueden actuar como sitios claves para la erosión (Parish *et al.* 2008).

A largo plazo se puede observar una reducción en la biomasa anual que se conserva en la superficie viva; esto puede conducir, en última instancia, a una disminución en el espesor de la acrotelma, resultando en una disminución de resistencia de las turberas a cambios lo que hace que los sitios sean más susceptibles a otros eventos (Worrall et al. 2010). Otros estudios (por ejemplo, Stark y Yläne 2015) mencionan que el pastoreo tiene efectos a largo plazo en el ciclo de carbono debido a la alteración en la vegetación que este produce. En contraste, hay estudios que mencionan que el pastoreo no es dañino en todos los casos; el de baja intensidad puede traer beneficios como impedir la invasión de especies arbóreas (Marsden y Ebmeier 2012).

2. Quemadas controladas

La quema controlada es utilizada en páramos para eliminar la vegetación más vieja y menos productiva y fomentar así la regeneración del brezo¹, la cual es más aceptada para el ganado (Worrall et al. 2010, Lindsay et al. 2014). Esta práctica es muy utilizada en las turberas del Reino Unido, donde aproximadamente el 18% de las mismas son sometidas a quemadas prescritas. Sin embargo, la misma es heterogénea y puede tener efectos positivos o negativos (Joint Nature Conservation Committee 2011, Worrall et al. 2010). Una variedad de estudios sugieren que la turba profunda puede cambiar luego de una quema debido al cambio de composición de musgos por brezos jóvenes, provocando un impacto negativo en el carbono almacenado en suelos (Glaves et al. 2013, Worrall et al. 2010, Lindsay et al. 2014). Glaves et al. (2013), indican que estos cambios se notarían con mayor intensidad si la quema es mal manejada, provocando que la turba se incendie. A su vez, los incendios forestales en este tipo de ecosistemas son de gran preocupación debido a que una vez establecidos son difíciles de extinguir y pueden liberar cantidades significativas de carbono, provocando así la pérdida "activa" (producción de turba) lo que genera que su capacidad de resiliencia ante presiones externas como el cambio climático sea disminuida o perdida (Glaves et al. 2013, Worrall et al. 2010, Greenpeace s.f.)

3.5.2. Drenado

Es habitual que la turba contenga un nivel de humedad superior al 95% si no ha sido perturbada. Esta presencia de agua es lo que permite que se genere una turbera y que sea funcional (Lindsay et al. 2014). Las turberas pueden ser drenadas por varias razones: estabilizar el sustrato para la construcción, aumentar la productividad del suelo para agricultura o silvicultura (eliminar las condiciones anaeróbicas), construcción de carreteras o para aumentar la capacidad del suelo para soportar así maquinaria pesada para procesos industriales (extracción de turba o petróleo) (Landry y Rochefort 2012)

¹ Arbusto enano y reptante, de tallos ramosos, hojas perennes y aciculares.

El drenado de estos ecosistemas suelen ser procesos difíciles y lentos debido a las dos capas de suelo; solo el acrotelmo puede ser fácilmente drenado. Los efectos del drenado parecen insignificantes, pero son significativos porque provocan pérdida de especies adaptadas a las condiciones propias del ecosistema, cesan la formación de la turba y provocan que haya competencia entre especies de plantas no formadoras de turba que antes no existían en el sitio (Marsden y Ebmeier 2012).

3.5.3. Contaminación atmosférica

Estudios como los de Littlewood *et al.* (2010) y De VleeSchouwer *et al.* (2010), demuestran que las turberas que se encuentran a favor del viento de industrias pesadas ven reducido su crecimiento debido a que la emisión de contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂) acidifica el suelo. Otros estudios (Yeloff *et al.* 2006), demuestran que debido al SO₂ emitido por industrias desapareció el *Sphagnum*, vegetación característica de turberas, del Distrito Peak en el siglo XIX. La reducción en la cobertura de la vegetación de las turberas conduce a la erosión de los suelos de turba porque aparecen parches de tierra desnuda, los cuales son más susceptibles a incendios forestales (Marsden y Ebmeier 2012 y Evans *et al.* 2016).

3.5.4. Forestación

La forestación que se practica en las turberas depende del drenaje y el arado profundo de la misma, causando erosión a largo plazo, agrietamiento profundo y oxidación dentro y fuera de las plantaciones (Littlewood *et al.* 2010). Stroud *et al.* (1987) explican que la forestación en una turbera provoca la pérdida de la vegetación y después de 10-15 años el bosque podría cerrarse provocando que los árboles sequen la turba. Además, el impacto de esta actividad sobre la fauna puede extenderse más allá del área plantada.

En Gran Bretaña se estima que hay aproximadamente 200 000 hectáreas de turberas que han sido plantadas con árboles mediante drenajes, arado profundo y uso de fertilizantes. Esto ha expuesto la turba a la atmósfera, provocando una aceleración en su descomposición y erosión. Para revertir este proceso, las últimas estrategias de restauración contemplan talar las plantaciones dando como resultado un aumento en el nivel freático de la turbera. Subsecuentemente, se promueve el restablecimiento de la vegetación de turbera (Anderson 2010).

3.5.5. Extracción de turba

La turba por lo general se acumula a una tasa de 0,5-1 mm por año, por lo que una profundidad de 1 metro puede demorar aproximadamente 1000 años para formarse. La extracción de turba consiste en la remoción del acrotelmo con su vegetación activa. Cuando esta actividad se genera de manera colectiva puede generar daños durante largos periodos que pueden resultar en consecuencias

permanentes (IUCN 2014) porque supera su capacidad de almacenamiento. Esta actividad puede tener impactos tales como el secado de la turba, pérdida de vegetación y pérdida de la capacidad de descomposición (Littlewood *et al.* 2010 y Marsden *et al.* 2012).

Uno de los casos de extracción más estudiados se da en Escocia, donde se extrae la turba para elaborar compost. La actividad se ve centrada en turberas elevadas de tierras bajas, ya que ese tipo de turba es la más adecuada para este propósito. Las destilerías de whiskey en Escocia usan pequeñas cantidades de turba durante el proceso de añejado para darle un sabor particular a la bebida. La cantidad de turba extraída comercialmente en Escocia fluctuó aproximadamente de 440 000 m³ por año durante los últimos 10 años (RSPB Scotland 2011). En el 2010, se extrajo turba de 23 sitios activos como fuente de energía para la producción de whisky y el resto para horticultura, y unas 20 000 toneladas para generar combustible (Taylor 2015).

Este tipo de extracciones o cortas realizadas en las turberas pueden provocar impactos a largo plazo sobre la biodiversidad del sitio, aunque este varía según la turbera. En muchos casos se pueden dar cambios o cortas en sitios lejanos a turberas que logran afectar los procesos hidrológicos de las mismas por lo que se generan impactos en las turberas (Yeloff *et al.* 2006). En Irlanda, las turberas que presentan extracción mediante procesos mecanizados que luego son abandonadas tienden a tener una regeneración más rápida. Cuando la extracción se da por procesos menos invasivos, estas tienden a presentar una regeneración más lenta (Cooper *et al.* 2001).

3.5.6. Infraestructura

En la última década, se ha notado una creciente preocupación por los daños causados y los impactos de los parques eólicos y mástiles de comunicación desarrollados en turberas (Marsden y Ebmeier 2012)). Toda la infraestructura asociada, como las vías de acceso y las cimentaciones pueden provocar cambios o alteraciones en el sistema hidrológico y cambios en la vegetación (Littlewood *et al.* 2010).

En Escocia hubo uno de los mayores casos, un proyecto de 181 turbinas de Lewis Wind Power generó preocupación nacional debido a la cantidad de carbono que podía ser liberado, dando como resultado el rechazo por parte del gobierno (Bright *et al.* 2010). Desde ese entonces, el Scottish Natural Heritage (SNH, por su sigla en inglés) y Single Euro Payments Area (SEPA, por su sigla en inglés) han desarrollado una serie de directrices sobre buenas prácticas y sobre cómo gestionar los ecosistemas de turberas que hayan sido perturbadas por actividades de construcción. Bright *et al.* (2010) demostraron que en Escocia se logró ver cambios en la avifauna de las turberas, en la calidad del agua, alteraciones en el escurrimiento de esta y un aumento en las emisiones de carbono.

3.5.7. Otros usos

El musgo en las turbas puede absorber líquido hasta 10 veces más que su peso seco. Desde mediados del siglo XIX hasta la segunda guerra mundial, en Europa se retiraban musgos de turba para utilizarse como cama para animales, especialmente caballos; filtro para gases, olores y líquidos (biofiltración el cual es un sistema para el tratamiento de efluentes de fosas sépticas) y producir carbón (Rieley 2014). Además de esto, las turberas y la turba (o sus derivados) se usan para absorber impurezas en las empresas farmacéuticas, utilizando carbón de turba; absorber derrames de aceite usando turba; aislar térmicamente las construcciones, mezclando la turba con alquitrán y yeso como material aislante; confección de tejidos de las fibras de las hojas y tallos de la vegetación; preparación de betunes, aceites y carbón vegetal con la vegetación; producción de compuestos plásticos; pañales de bebés; bolsas para guerra. En Alemania desde hace décadas, se utiliza la turba como agentes de curación en *spas* (Rieley 2014).

3.6. Turberas y mitigación al cambio climático

Las turberas son consideradas como fuente de diversos servicios ecosistémicos de importancia económica y social, incluyendo almacenamiento de carbono, biodiversidad y gestión del agua. Los daños provocados debido a las diversas amenazas pueden convertirlas en una fuente de GEI (Yu 2011). Gorham (1991), explicó que a pesar de que las turberas conforman una parte pequeña de la superficie terrestre (2% - 3%), son uno de los ecosistemas con mayor acumulación de materia orgánica. Por consiguiente, son importantes almacenes de carbono que pueden llegar a representar un tercio (250 a 450 Pg, 1 Pg= 1Gt= 10¹⁵ g) de la reserva mundial del carbono terrestre. Este secuestro de carbono es una de las principales causas de la disminución de CO₂ atmosférico (Gorham 1991; Joosten et al. 2002 y IUCN 2014). Por lo tanto, las turberas representan un importante sumidero de CO₂ a largo plazo (Gorham 1991, Roulet *et al.* 2007).

Las turberas sufren constantes perturbaciones que exponen la turba a la atmósfera. Esto provoca alteraciones significativas en el ciclo del carbono (Roulet *et al.* 2007), al punto que se podrían convertir en fuentes de emisión de carbono a la atmósfera y a ecosistemas acuáticos (Dawson y Smith 2007).

Por consiguiente, muchos países, agencias y convenios internacionales han incluido a las turberas para protección y restauración, con el fin de conservar las existencias de carbono existentes y ayudar a mitigar el cambio climático (Worrall *et al.* 2010). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en conjunto con el IPCC, han estimado que las emisiones de GEI provenientes de las turberas tienen como fuente varios sectores: energía, agricultura y uso de la tierra, cambio uso de la tierra y silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés). En estos análisis solo se toman

en cuenta las emisiones provenientes de fuentes antropogénicas (Lapveteläinen y Pipatti 2008), por lo que existe un vacío sobre las emisiones de manera natural emitidas por las turberas. Lo anterior refuerza el valor de la investigación en cuanto a gases de efecto invernadero debido a que solo se han muestreado aquellas que han sufrido algún cambio en su suelo.

3.7. Almacenamiento de carbono

Las turberas, incluyendo su vegetación, contienen mayores concentraciones de carbono orgánico en sus suelos que otros ecosistemas terrestres (Figura 8). En la zona polar, las turberas contienen 3,5 veces más carbono orgánico que en otros ecosistemas con suelo mineral. En las zonas boreales se estima que contienen siete veces más y en las turberas tropicales, debido a las condiciones climáticas (Rieley *et al.* 2008), pueden almacenar 10 veces más carbono orgánico en suelos que en otros ecosistemas como bosques tropicales, praderas, sabanas, etc. (Parish *et al.* 2008). Se estima que las turberas a nivel global albergan entre 500 y 600 Gt de carbono en sus suelos (Clymo *et al.* 1998, Joosten 2009, Wu y Blodau 2013). En todo el mundo, las turberas no alteradas (> 3 millones de km²), actualmente secuestran hasta 100 megatoneladas de carbono por año (Joosten 2015).

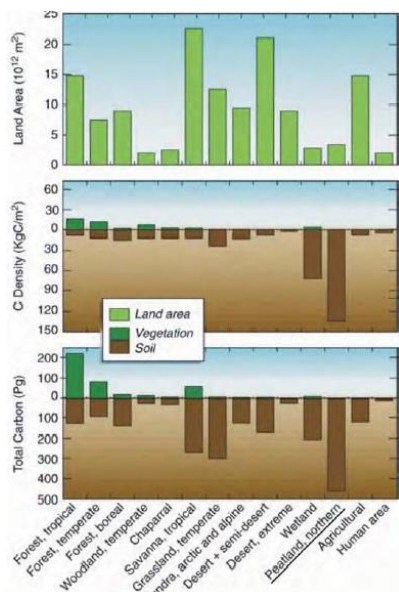


Figura 8. Carbono contenido en las turberas del mundo comparado con otros reservorios terrestres. Fuente: Parish *et al.* (2008).

Este carbono almacenado en las turberas puede representar el 30% del total en el subsuelo continental, llega a duplicar la biomasa forestal y se aproxima al total de la biomasa terrestre. Esto ha convertido este ecosistema en un almacén a largo plazo en la biosfera terrestre (Parish *et al.* 2008, Iturraspe 2010). Las turberas almacenan el 75% de carbono atmosférico terrestre (Joosten *et al.* 2012), por lo que se considera el segundo reservorio de carbono más importante a nivel mundial (Parish *et al.* 2008). Este carbono puede ser almacenado en diferentes partes del ecosistema: en la biomasa, turba,

hojarasca o capa mineral del subsuelo (Parish *et al.* 2008). Las turberas naturales están más cerca que las turberas alteradas del punto de inflexión entre ser una fuente de carbono o un sumidero, debido a que cualquier cambio en las condiciones como alteraciones en su hidrología, extracción de turba y cambios de temperaturas podría provocar alteraciones en los ciclos de carbono, hidrológicos, geológicos etc., haciéndolas sensibles al cambio climático y al impacto humano (Joosten 2015). A pesar de la importancia con la que se maneja este tema a nivel internacional, Costa Rica no cuenta con una investigación de estimación de carbono almacenado en turberas.

3.8. Flujos de GEI

Las turberas son ecosistemas que inciden en el balance global de tres tipos de GEI, ya que en su estado natural logran retener CO₂, pero liberan metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (Iturraspe 2010). Debido a las condiciones húmedas que se necesitan para la formación de turba, parte del material vegetal formador se descompone por la ausencia de oxígeno en el ecosistema, dando como resultado una emisión importante de CH₄ a nivel mundial (Joosten 2015). Este GEI es más fuerte que el CO₂ (1kg de CH₄ es 23 veces más potente que un 1 kg de CO₂ en términos de forzamiento radiactivo en un horizonte temporal de 100 años), pero presenta un período de permanencia atmosférico más corto (Forster *et al.* 2007).

Los flujos de GEI dentro y fuera de las turberas son complejos (Lindsay *et al.* 1988) y pueden depender de factores físicos, químicos y procesos biológicos (Joosten 2015). Uno de los factores más importantes son los cambios en los niveles de la capa freática; si se expone la turba se inicia el intercambio gaseoso (Worrall *et al.* 2010), seguido por la vegetación presente en el ecosistema. Es decir, si existe un cambio u alteración en la vegetación de la turbera se pueden generar cambios en los ciclos de gases (Marsden y Ebmeier 2012). Por otro lado, la emisión de metano en las turberas está en función de las tasas de producción, transporte y oxidación de las mismas. Elevadas tasas de descomposición de turba debido al calor o tasas bacterianas, sustratos con raíces y el transporte rápido a la superficie por procesos de absorción osmótica y a través de conductos, tales como raíces de plantas vasculares o tallos, generalmente conducen a altas emisiones de metano (Limpens *et al.* 2008). Se ha observado que existe una relación entre la descomposición y la acumulación en los ecosistemas debido a que dependen de la vegetación presente. Por ejemplo, algunas especies de musgos asociados a estos ecosistemas, como *Sphagnum* sp., son mucho más resistentes a la descomposición que las plantas vasculares (Marsden y Ebmeier 2012).

También puede haber flujos de óxido nitroso en algunos tipos de turberas. Estos flujos no han sido bien estudiados, pero uno de los casos más reconocidos ha sido el de Artz *et al.* (2012), quienes

demonstraron que el flujo de este gas es insignificante siempre y cuando la turbera no haya sido fertilizada con nitrógeno o la deposición de nitrógeno atmosférico no sea alta.

Se ha concluido que las turberas naturales sin alteraciones pueden ser acumuladoras netas de GEI; pero las degradadas, donde la turba está expuesta al aire, pierden CO₂ rápidamente debido a que el material orgánico se oxida y se erosiona (Worrall *et al.* 2010, Lindsay *et al.* 2014, Joosten 2015). En Costa Rica no se han realizado estudios de este tipo.

4. Metodología

En esta sección se incluyen todos los aspectos metodológicos considerados para el desarrollo de la investigación, iniciando por la descripción del área de estudio considerada, la elaboración del mapa, la descripción biofísica de las turberas, cuantificación de carbono en suelos y cuantificación de gases de efecto invernadero en los suelos de las turberas.

Área de estudio: Se estudiaron las turberas de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica, que forman parte del Parque Nacional Chirripó, el Cerro de la Muerte, la Reserva Forestal los Santos y el Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte (Figura 9); se estima que su extensión es de 192 520 ha. En la zona se presentan diferentes climas y temperaturas debido al gradiente altitudinal. En las zonas que se encuentran en altitudes medias se han registrado promedios anuales de temperatura que fluctúan entre 12°C y 22°C y en las zonas más altas se han registrado hasta -9°C.

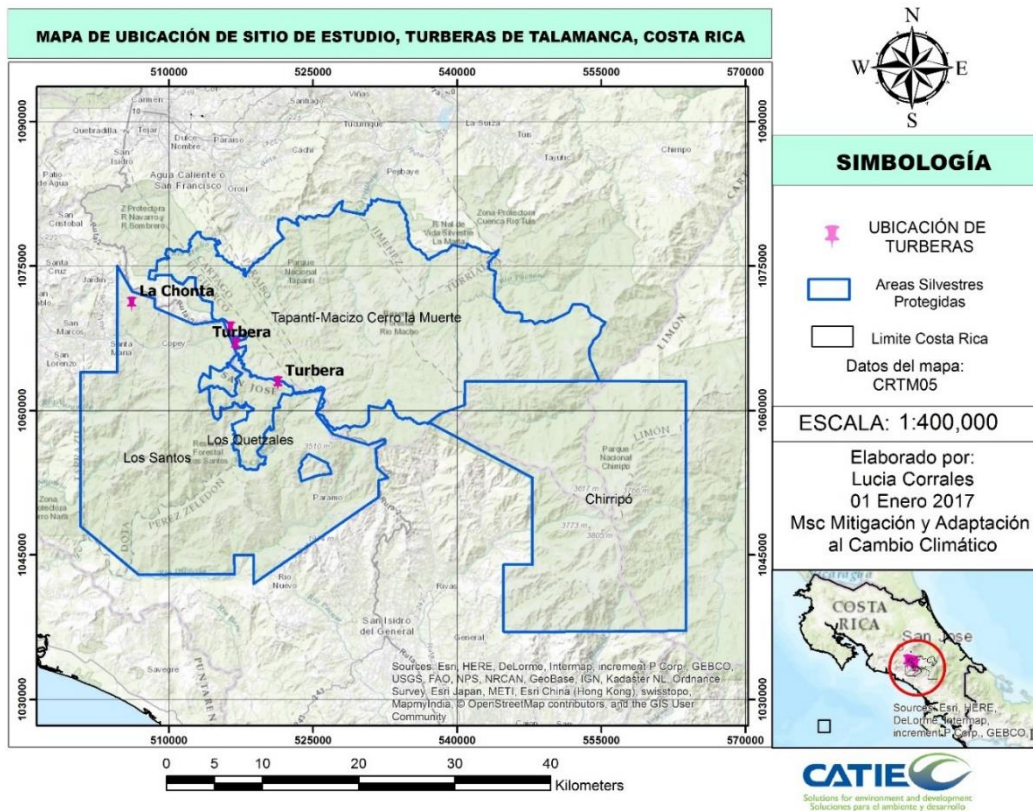


Figura 9. Ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

4.1 Elaboración de mapa

Para distinguir los diferentes tipos de cobertura de la tierra presente en el área de estudio, se utilizó imágenes Sensor SENTINEL de febrero del 2018 debido a lo reciente y disponibilidad para el área de estudio. En la Figura 10 se presentan las especificaciones técnicas de estas imágenes.

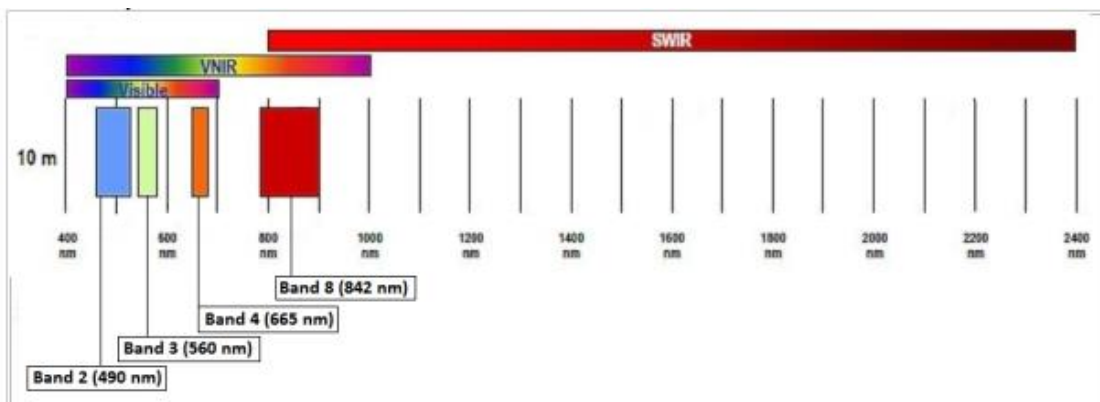


Figura 10. Especificaciones técnicas de SENTINEL-2

Fases de elaboración:

A. Diseño de muestreo: Se colectó información para clasificar la imagen y validar el producto de salida. Se elaboró un mapa con las vías de acceso de la zona (carreteras, trillos, trochas, caminos, etc.), a los cuales se les definió un área de influencia de 50 m a ambos lados y así se aleatorizó dentro del área de influencia los 300 puntos a muestrear. Los puntos se georreferenciaron con un GPS MAP60 en cada cambio de vegetación por medio de criterio experto, se llenó un formulario derivado de Corine Land Cover (2013) y se tomaron fotografías en cada punto muestreado.

Durante la elaboración del mapa y las visitas del campo se clasificaron seis usos/coberturas del suelo en la zona estudiada, los cuales son explicados e ilustrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Descripción de los usos del suelo identificados en las turberas de Talamanca, Costa Rica

Clasificación	Descripción	Fotografía
<p>Bosque</p>	<p>Ecosistema nativo o autóctono, intervenido o no, regenerado por sucesión natural u otras técnicas forestales, que ocupa una superficie mínima de dos hectáreas, caracterizada por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado, con uno o más doseles que cubren más del 70 % de esa superficie y donde existen más de 60 árboles por hectárea de 15 centímetros o más de diámetro medido a la altura del pecho (Ley Forestal 1995).</p>	

Páramo

Corresponde a la zona neotropical del bioma pantropical alpino-subalpino húmedo. Es una formación vegetal alto-montaña, heterogénea, psicrófita, muy vellosa, herbácea y generalmente desarbolada o con doseles abiertos de arbolitos tupidos. Se encuentran por encima de los bosques montanos o andinos, entre 2800-3200 ms.m. Se encuentran en la cordillera de Talamanca (Costa Rica y Panamá) y norte de los Andes (Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú) (Kapelle 2008).



Turbera

Zona de turba ácida, formada de materia vegetal parcialmente descompuesta en áreas musgosas e inundadas (INBio 2010).



<p>Cuerpos de agua</p>	<p>Masa de agua que llega a la superficie y es visible desde la tierra y el aire. Por ejemplo, lagos, lagunas y embalses (Kapelle 2008).</p>	
<p>Pastizal</p>	<p>Vegetación que sostiene el crecimiento de pastos y plantas pequeñas y en la que están ausentes las grandes agrupaciones de árboles o arbustos. Generalmente se utiliza para mantener ganado mediante el pastoreo (Kapelle <i>et al.</i> 2003).</p>	
<p>Agricultura</p>	<p>Arte y técnica de cultivar la tierra, principalmente para fines alimentarios (Kapelle 2008)</p>	

B. Diseños de respuesta: Se buscó armonizar la información de la primera fase para que fuera comparable con la resolución espectral de las imágenes. Utilizando el *software* ENVI 5.3 se compararon las clases informacionales con las clases espectrales por medio del proceso

“Separabilidad de firmas”. Se utilizó la herramienta “Divergencias transportadas” para poder generar la leyenda de salida de los mapas.

Método de clasificación por objetos (OBIA, por sus siglas en inglés):

Es una técnica que se utiliza para analizar imágenes satelitales. Esta clasificación se basa en información de píxeles; adiciona un análisis basado en información de un conjunto de píxeles similares llamados objetos. Estos objetos de la imagen son las agrupaciones de píxeles con características similares como: tamaño, forma y textura, además del contexto que lo rodean (Guo *et al.* 2007).

C. Diseño de análisis: Se buscó evaluar la confiabilidad global e interclases. Se creó una matriz de confusión para evaluar el desempeño del mapa elaborado (Olofsson *et al.* 2014). Se utilizó el 10% de las clases informacionales para validar los puntos.

El análisis principal de la matriz de confusión se basó en la exactitud o fiabilidad global (EG) de la clasificación, la cual explica el porcentaje total de píxeles clasificados correctamente en la imagen, es decir, los aciertos. Este índice de fiabilidad brinda una idea general de la exactitud de la clasificación, pero no aporta ningún dato sobre la precisión obtenida para cada clase. Para lograr obtener la fiabilidad de cada una de las categorías, se realizaron análisis de elementos marginales de la matriz de confusión. Se evaluó la exactitud o fiabilidad del productor (FP), la cual explicó el porcentaje de verdades del terreno que se clasificaron correctamente. Este está asociado a los errores de omisión, que indican el número de píxeles que pertenecen a una categoría determinada y no fueron incluidos en ella (Olofsson *et al.* 2014, Boca y Rodríguez 2012).

Luego se evaluó la exactitud o fiabilidad del usuario (FU), la cual determina el porcentaje de píxeles que fueron asignados correctamente a la categoría que pertenece, que es inversamente proporcional a los errores de comisión. Los errores de comisión explican cuántos píxeles fueron incluidos en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra (Olofsson *et al.* 2014, Boca y Rodríguez 2012).

Mediante los análisis realizados se determinó cual mapa presenta mayor concordancia entre las clases informacionales y espectrales.

4.2. Descripción biofísica de las turberas

Se utilizó como base la metodología de Kauffman *et al.* (2013) la cual se modificó debido a la variabilidad vegetal en los sitios, relieve y presencia de agua. En cada uno de los sitios de muestreo se trabajó con tres parcelas circulares con un radio de 7 m, ubicadas al azar para mantener la variabilidad del sitio (Figura 11). Este diseño permitió una buena estimación de composición y estructura del ecosistema de turbera.

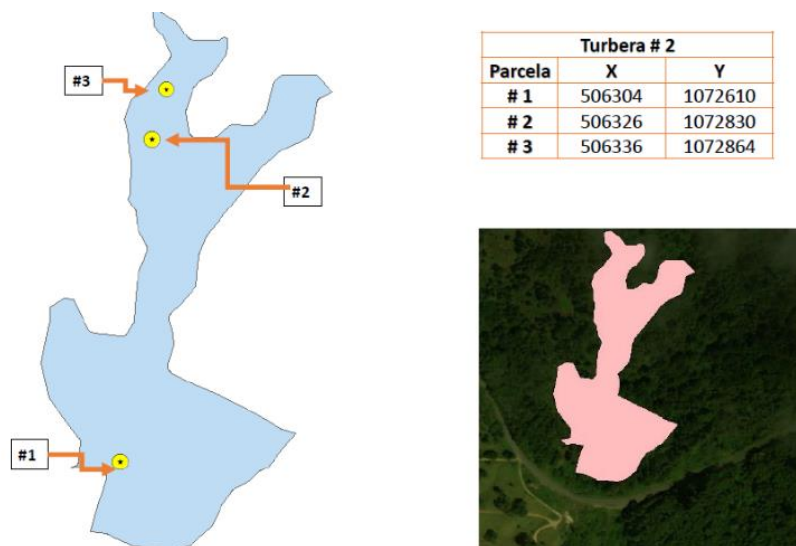


Figura 11. Distribución espacial de las parcelas de estudio en las turberas de Talamanca, Costa Rica

4.2.1. Análisis florístico

Para el análisis florístico se recolectó una muestra por cada especie encontrada dentro de las tres parcelas establecidas en cada sitio seleccionado. Además, se tomó el diámetro a la altura del pecho (DAP).

Las muestras vegetales fueron tomadas, en lo posible, con hojas y flores para facilitar su identificación y se mantuvieron en prensas para vegetación para posteriormente ser trasladadas al laboratorio de biología de la Universidad de Latina de Costa Rica.

En el laboratorio estas muestras se colocaron en el horno bajo una temperatura de 65°C durante 48 hrs, siguiendo el protocolo del Herbario del Museo Nacional en donde posteriormente fueron identificadas con la colaboración de personas expertas y guías de identificación. Finalmente, se levantó una lista de especie encontradas en las turberas de Costa Rica (Anexo 1).

Composición florística

Se determinó mediante la cuantificación del índice valor de importancia (IVI) de las especies; este índice consiste en la sumatoria de los valores relativos de densidad, frecuencia y dominancia e indica la importancia ecológica relativa de las especies de plantas en una comunidad (Soler *et al.* 2012, Matteucci y Scientific 2015).

Los parámetros utilizados fueron:

Índice de valor de importancia (IVI):

$$IVi = A_i + D_i + F_i$$

i = especies de la comunidad, 1...n

Abundancia: número de individuos por especie que se encuentran en la comunidad: Abundancia (A): $A_i = N_i / S$ $AR_i = (A_i / \sum A_i) * 100$ $i = 1...n$

Donde AR = abundancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total, N_i = número de individuos de la especie i , S = superficie (ha) e i = especies de la comunidad, 1...n

Dominancia: una especie es dominante cuando tiene una gran influencia sobre la composición y forma de la comunidad. Son especies de gran éxito ecológico y relativamente abundante dentro de la comunidad.

Dominancia (D): $D_i = A_{bi} / S$ $DR_i = (D_i / \sum D_i) * 100$ $i = 1...n$

Donde A_b = sección del fuste a 1,3 m de altura (m^2), DR = dominancia (densidad) relativa de la especie i respecto de la dominancia total de la comunidad, i = especies de la comunidad, 1...n y S = superficie (ha).

Frecuencia: es el número de veces que una especie se presenta en una cantidad dada de parcelas o puntos de muestreo. Se evaluó la contribución de cada especie a la constitución de la comunidad mediante la fórmula: $FC_i = n_i / \sum n_i * 100$,

donde: FC = frecuencia centesimal de la especie i , n_i = número de unidades de muestreo donde se encuentra la especie i y $\sum n_i$ = sumatoria del número de unidades de muestreo en las que encuentra la especie i .

4.2.2. Variables biofísicas

Para la descripción biofísica de los sitios se midieron el pH, nivel freático y la profundidad máxima de la turbera.

Se realizaron mediciones de pH, profundidad máxima y nivel freático. El pH se midió para clasificar las turberas de Costa Rica según su formación (Sjörs 1950), además de explicar el tipo de vegetación presente en la zona. Esta clasificación fue relevante para este estudio porque es utilizada a nivel internacional y aceptada por el IPS (Cuadro 4). Se utilizó un pH-metro y se repitieron las mediciones tres veces en cada parcela circular (Parish *et al.* 2008).

Cuadro 4. Clasificación de la turbera mediante el pH según la propuesta de Sjörs (1950)

Tipo de turbera	Rango pH
-----------------	----------

Ombrotrofica	3,7 - 4,2
Muy pobre minerotrofica	3,8 - 5,0
Transición pobre minerotrofica	4,8 - 5,7
Minerotrofica	5,2 - 6,4
Minerotrofica rica	5,8 - 7,0
Minerotrofica exceso	7,0 - 8,4

Para medir el nivel freático se tomó la distancia entre la superficie del terreno y la superficie de agua dentro del agujero realizado por el cilindro de muestreo, para determinar el grado de inundación de las turberas. Debido a que esta variable varía estacionalmente, el nivel medido representa la condición instantánea de inundación de cada sitio muestreado.

4.3. Cuantificación de carbono en suelos

En el centro de cada parcela se extrajo un núcleo de 50 cm de profundidad con un barreno especial para ecosistemas como turberas, el cual crea un vacío mediante una tapa para así no perder muestra durante la extracción. Además, se utilizaron "Snow probes" para poder determinar la profundidad máxima del perfil de turba. El núcleo se dividió en profundidades de 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm (Kauffman *et al.* 2013). Para determinar la densidad aparente (DA) del suelo, se tomaron muestras de 3 cm de largo en la parte central de cada rango de profundidad del núcleo extraído. La muestra de DA se llevó al laboratorio de suelos del CATIE hasta secar a peso constante bajo una temperatura de 105°C durante 24 hrs. La muestra de suelo que sobró luego de sacar los 3 cm se reservó para llevarla posteriormente al laboratorio de XXXX del CATIE para determinar la concentración de carbono en los suelos mediante carbono por combustión total. El carbono en el suelo ($Mg\ ha^{-1}$) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Carbono del suelo (Mg/ha}^{-1}\text{)}: \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)} * \text{Intervalo de la muestra (cm)} * \% \text{ de carbono}$$

4.4. Cuantificación de gases de efecto invernadero en los suelos de las turberas

Se utilizó el método de muestreo de cuadrado latino (Cuadro 5), para controlar errores de las cámaras como filtración de aire, abanicos y temperaturas dentro de las mismas; además de controlar variables ambientales de los sitios como temperatura, agua presente y vegetación. Para la selección de

las turberas donde se colocaron las cámaras de gases, se realizaron *clúster* tomando la altura de los sitios a lo largo del área de estudio desde los 2290 hasta 3194 (msnm). En total se consideraron cinco clústeres, en cada uno de los cuales se escogió al azar una turbera, en la cual se establecieron tres parcelas al azar tomando en cuenta un *buffer* de 200 m para evadir el efecto de borde del bosque o calle. En estas parcelas se colocaron las cámaras estáticas para los análisis (Figura 12).

CÁMARA					
Turbera 1	A	B	C	D	E
Turbera 2	B	C	D	E	A
Turbera 3	C	D	E	A	B
Turbera 4	D	E	A	B	C
Turbera 5	E	A	B	C	D

Cuadro 5. Diseño del Cuadrado Latino empleado en el estudio.

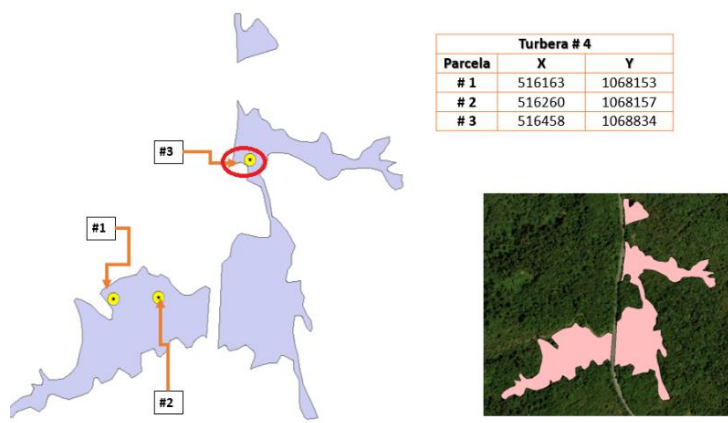


Figura 12. Distribución espacial de las cámaras estáticas dentro de cada turbera elegida, Talamanca, Costa Rica

4.4.1 Intercambio de GEI

Se midieron los flujos de CO₂ y CH₄ del suelo mediante la técnica de la cámara estática cerrada (Wu *et al.* 2009). Esta cámara funciona sin entrada ni salida de aire, de tal manera que permite la acumulación de GEI con el tiempo y las concentraciones de los GEI, especialmente CH₄ y CO₂. Al permitir la concentración de estos gases, sin entrada ni salida de aire, tienden a aumentar los niveles de gases concentrados, lo cual podría garantizar resultados con poca incertidumbre (Wu *et al.* 2009, Parra *et al.* 2010).

Para el muestreo se elaboraron cámaras estáticas (Figura 13) de acrílico de 20 x 20 x 25 cm (L x L x H). A cada cámara se le colocó un ventilador electrónico de 6 cm de 3400 rpm, a los cuales se les realizó una conexión eléctrica conectada a una batería de 9 voltios, con un apagador por el lado

de afuera para homogenizar la muestra durante su extracción y un termómetro de lápiz para que durante la extracción de la misma se lograra registrar la temperatura dentro de la cámara debido a la estrecha relación entre temperatura y flujos de GEI. Además, se elaboraron aleros de acrílico para que las zonas que estuvieran inundadas tuvieran la oportunidad de flotar.

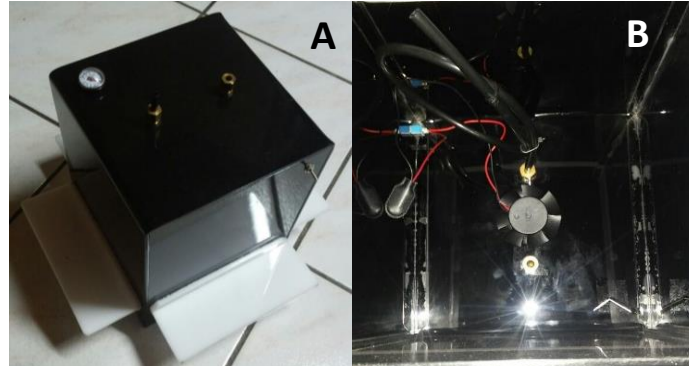


Figura 13. Imagen de las cámaras elaboradas. A. Visualización externa de la cámara. B. Conexiones internas

Las muestras de gases se recolectaron para cada punto de muestreo a los 0, 5, 10, 30 y 60 minutos durante tres tiempos del día mañana (6:00 am-7:30 am), medio día (12:00 md-1:00 pm) y tarde (4:00 pm-5:00 pm). Los gases se recolectaron de forma manual con una jeringa de 9 ml. La muestra extraída de gases se colocó en viales al vacío marca Vacuette de 9 mL para su posterior análisis cromatográfico en el Laboratorio Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional de Costa Rica.

5. Resultados y discusión

En esta sección se incluyen los resultados obtenidos en el estudio, iniciando con la elaboración del mapa, la descripción biofísica, la cuantificación del carbono almacenado en los suelos y, por último, el análisis de gases de efecto invernadero.

5.1. Mapa

En la Figura 14 se presenta el mapa elaborado durante el estudio y en la 15 la matriz de confusión generada para determinar su confiabilidad.

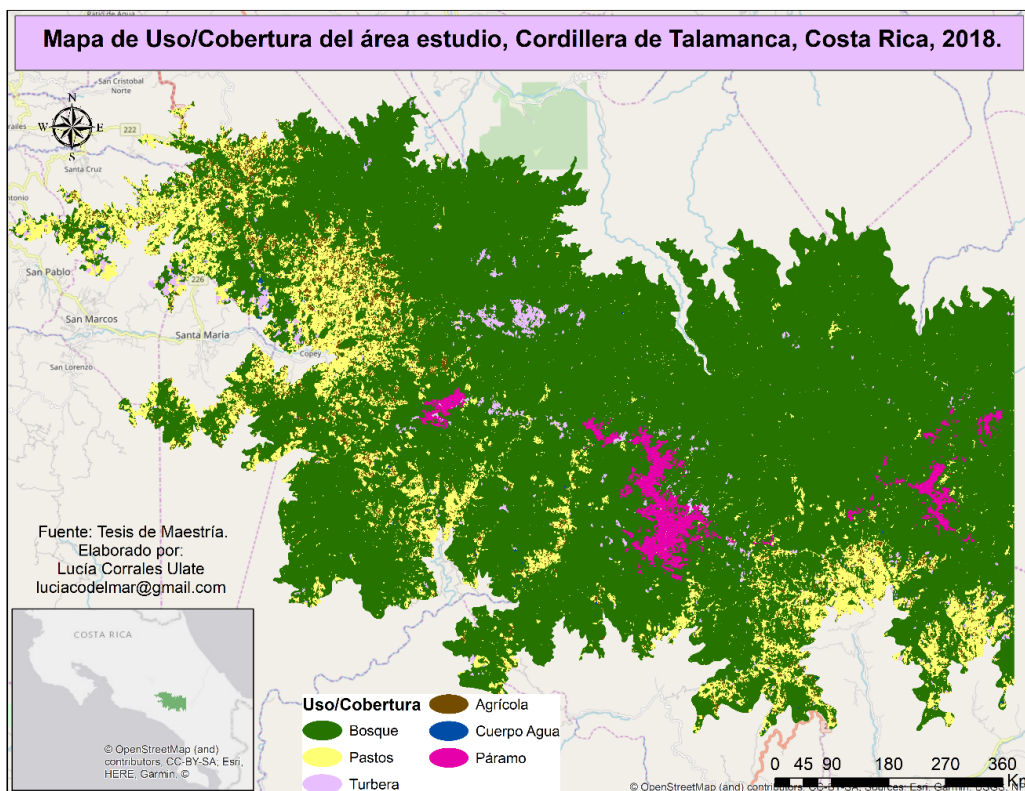


Figura 14. Mapa final de la ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

TERRENO	MAPA						TOTALES CLASIFICADOS	EXACTITUD PRODUCTOR	ERROR OMISIÓN
	Bosque	Pasto	Turbera	Agrícola	Agua	Paramo			
Bosque	169	7	3	1	0	1	181	93,4	6,6
Pasto	1	15	0	4	0	0	20	75,0	25,0
Turbera	1	0	6	0	0	1	8	75,0	25,0
Agrícola	0	1	0	6	0	0	7	85,7	14,3
Agua	0	0	0	0	3	0	3	100,0	0,0
Paramo	0	1	1	0	0	4	6	66,7	33,3
TOTALES VERDADEROS	171	24	10	11	3	6	225		
EXACTITUD USUARIO	98,8	62,5	60,0	54,5	100,0	66,7	173	Clasificados correctamente	
ERROR COMISIÓN	1,2	37,5	0,0	45,5	0,0	33,3	76,89	Exactitud global	

Cuadro 6. Matriz de confusión generada para determinar la confiabilidad del mapa final de ubicación de las turberas de Talamanca, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Basándonos en la matriz de confusión desarrollada (Cuadro 6), se puede determinar que la confiabilidad del mapa elaborado es de un 76,89%, lo cual quiere decir que 77 de cada 100 píxeles en el mapa fueron correctamente clasificados.

A pesar de que la exactitud global del mapa es relativamente alta, si se hace un análisis más profundo de la misma se podrían encontrar categorías en que los errores de omisión y comisión son altos como los son los casos del páramo, turbera y agrícola. Esto podría explicarse o mejorarse mediante un trabajo de campo más detallado, complejidad misma del paisaje y falta de imágenes de resolución espacial mayor. Aumentar el esfuerzo de campo para la captura de datos y complementarlo con otras tecnologías como la de los drones y acceder a sitios más remotos los cuales no se pudieron visitar por asuntos logísticos.

Según los datos espaciales obtenidos a través de la validación del mapa realizado, se estima que el área de estudio cuenta con una extensión de 89 182 ha (Cuadro 7) de las cuales el 82% está cubierto de bosque, seguido de un 12% de pastos. Se logró estimar que la cobertura por turberas en el área de estudio cuenta con una extensión de 1322 ha, equivalentes a un 1,3% de la superficie total de la zona.

Cuadro 7. Extensión aproximada del área estudiada según el uso del suelo. Cordillera de Talamanca, Costa Rica.

Uso del suelo	Superficie (ha)
Bosque	72926,5
Pasto	10968,5
Turbera	1322,9
Agrícola	2058,4
Agua	66,1
Páramo	1840,3
Total	89 182,7

La Cordillera de Talamanca surgió bajo un proceso similar al que dio origen a la Cordillera de los Andes, conocido como tectonismo de subducción con vulcanismo asociado. Esta cordillera se encuentra ligeramente sesgada hacia el litoral pacífico debido a lo ancho del istmo centroamericano y alcanza altitudes promedio de 3800 msnm (Castro 2005).

La cordillera presenta áreas planas y planocóncava que favorecieron la formación de turberas debido a los aportes de humedad provenientes del caribe y el pacífico. Debido a estas aportaciones, el área alcanza un promedio de 2200 mm a 3300 mm anuales de precipitación, con 3 a 4 meses secos y presencia de bancos de niebla durante todo el año (Gómez y Herrera 1993).

Mediante estudios paleo-limnológicos se ha determinado que, durante el último periodo glacial, se ha podido comprobar que el límite del páramo (que hoy se encuentra a partir de los 3300 msnm) cubría ciertas áreas que hoy en día son turberas (Islebe, y Hooghiemstra 1997).

Todas estas condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas han favorecido la formación de suelos histosoles, que son jóvenes y con buena presencia de humus, con pendientes entre 30-60% (Pérez *et al.* 1978). El agua por escorrentía es el principal aporte hídrico para las formaciones de los espejos de agua en las turberas, así como para la capturada de gran cantidad de plantas vasculares y briófitas existentes.

Las turberas ubicadas en el área estudio, según se puede observar, están rodeadas por parches de bosques, pero pese a su presencia, se encontró que las principales turberas consideradas en el estudio están amenazadas por prácticas agrícolas, presencia de ganado (aunque esta es poco usual hoy en día) y la construcción de torres de alta tensión por el Instituto Costarricense de Electricidad (Figura 15A)

Además, en ciertos casos se pueden observar la instalación de criaderos de truchas o estanques recientes (Figura 15B), lo cual podría estar causando un flujo de nutrientes hacia la misma, lo que provoca la eutroficación de su ambiente acuático. Esta clase de amenaza podría causar la pérdida de especies especializadas, además del favorecimiento de la invasión de especies más agresivas e invasoras.

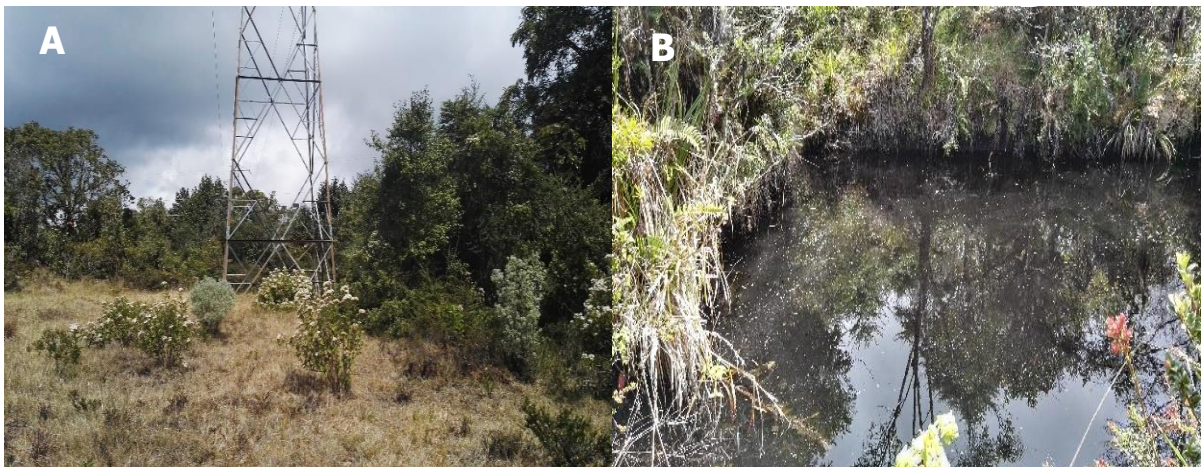


Figura 15. A. Torre de alta tensión del Instituto Costarricense de Electricidad construida dentro de la turbera 3 de Junio. B. Estanque elaborado en la turbera 3 de Junio.

Cabe mencionar que durante la realización de la investigación se presentó un evento natural hidrometeorológico extremo, conocido como la tormenta Nate, la cual provocó una perturbación de la integridad de los ecosistemas y algunos sitios de muestreo (Figura 16).



Figura 16. Turbera afectada por la tormenta Nate, mes del 2018, cordillera de Talamanca, Costas Rica

5.2. Descripción biofísica de las turberas

5.2.1. Análisis florístico

La flora de las turberas en estudio reúne 64 especies (Anexo 1), distribuidas en 51 géneros y 31 familias (Cuadro 8). Según los registros encontrados, la clase más frecuentes fue la Magnoliopsida con 16 familias y la de menor presencia ls Liliopsida con 4 familias. Las familias con mayor dominancia fueron Ericaceae con 10 especies, Rosaceae con 6 especies y Asteraceae con 6 especies.

El estudio realizado por Domínguez y Vega-Valdés (2015), demuestra que las turberas de Magallanes presentan mayor presencia de las clases Magnoliopsida y Liliopsida debido a la diversidad de factores geomorfológicos presentados en la zona como lo es el pH. Tanto las turberas de Magallanes como las de Talamanca se clasifican como turberas minerotróficas, por lo que se podría deducir que existen similitudes entre ambas debido a una serie de factores climáticos y geomorfológicos de ambos sitios.

Cuadro 8. Estructura taxonómica de la flora de las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica

Clase	Familias	Género	Especie
Liliopsida	4	5	5
Magnoliopsida	16	33	41
Monocotyledoneae	5	7	10
Polypodiopsida	6	6	8
Total	31	51	64

En el Cuadro 9 se observan las cinco especies con los mayores índices de valor de importancia ecológica del área de estudio: *Blechnum chiriquanum* (22) (Figura 17A), *Chusquea* sp. (19) (Figura 17B), *Pteridium aquilinum* (18), *Zanthoxylum melanostictum* (19) y *Pteridium arachnoideum* (14).

Las especies menos abundantes en el área de estudio fueron *Hymenophyllum* sp. (2), *Myrsine* sp. (2), *Agrostis toluensis* (2), *Carex donnell-smithii* (2) y *Macleania insignis* (2). Se podría indicar que estas especies tienden a ser más sensibles a las perturbaciones ambientales, es decir, identificar un cambio en la diversidad ya sea en el número de especies, en la distribución de la abundancia o dominancia y alertar sobre procesos empobrecedores (Jiménez *et al.* 2010).

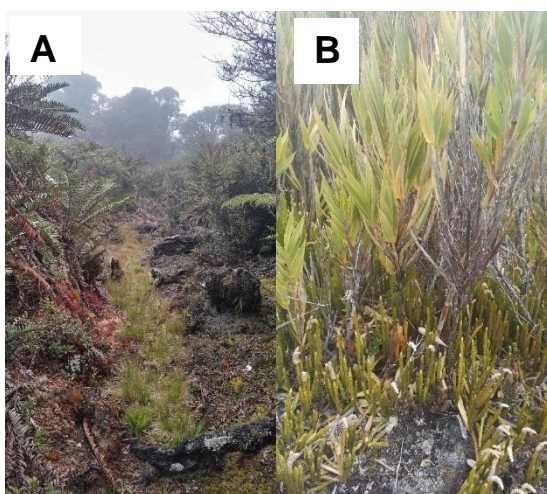


Figura 17. A. Helecho *Blechnum chiriquanum* presente en la turbera km 62. B. *Chusquea* sp. presente en la turbera Los Quetzales, cordillera de Talamanca, Costa Rica

Brak *et al.* (1902), encontraron en la turbera La Chonta, una asociación florística importante y característica de la zona compuesta por *Blechnum chiriquanum* y otras especies como *Escalonia myrtilloides* y *Plagiogyria semicordata*. Estos autores indican que esta es una comunidad boscosa de tipo transicional, característica de los bosques marginales alrededor de las mismas y que si existiera una alta presencia de estas especies podrían darse cambios en el ambiente o perturbaciones en el ecosistema fomentado el desarrollo de las especies dentro del mismo.

Cuadro 9. Índice de valor de importancia (IVI) ecológica de las 10 especies florísticas más importantes de las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica

Especie	Dominancia	Abundancia	Frecuencia	IVI
<i>Blechnum chiriquanum</i>	11	7	4	22
<i>Chusquea</i> sp.	5	9	5	19
<i>Pteridium aquilinum</i>	9	6	3	18
<i>Zanthoxylum melanostictum</i>	11	3	4	18

<i>Pteridium arachnoideum</i>	6	4	4	14
<i>Paepalanthus costaricensis</i>	3	4	4	11
<i>Montiralia lirmipes</i>	3	4	4	10
<i>Pernettya prostrata</i>	3	4	4	10
<i>Clusia sp.</i>	6	1	1	9
<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	2	3	4	9
Primeras 10 sp.	59	45	36	139
Resto de las sp.	41	55	64	161
Total	100	100	100	300

La intensidad y el esfuerzo de muestreo realizado en este estudio permitieron incrementar el conocimiento de la riqueza y composición vegetal de las turberas de Costa Rica. Aunque es necesario profundizar en el conocimiento de las asociaciones presentes en las turberas para determinar especies claves en los sitios y así poder identificar áreas amenazadas, especies en peligro y monitorear el efecto de las perturbaciones tanto naturales y antropogénicas.

5.2.2. Variables biofísicas

5.2.2.1. pH

Los datos de pH mostraron un promedio mínimo de 6,6 y máximo de 7,5 (Cuadro 10). Estos resultados demuestran que las turberas de Costa Rica pueden ser clasificadas según Sjö (año) y el IPCC (año), como "turberas minerotróficas". La turbera minerotrófica puede describirse como un medio húmedo cubierto por una capa de turba en el que el manto freático se sitúa a nivel de la superficie del suelo o ligeramente por encima. El agua que alimenta este tipo de turbera, por lo general, se encuentra en contacto con material o sustrato geológico dando como resultado minerales disueltos en el agua (Martínez Cortizas y García-Rodeja Gayoso 2009).

Cuadro 10. Clasificación las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica mediante pH

Identificación	Ph prom	CLASIFICACIÓN
Turbera 1	7,1	Minerotrófica Exceso
Turbera 2	7,3	Minerotrófica Exceso
Turbera 4	6,4	Minerotrófica Rica
Turbera 5	6,5	Minerotrófica Rica
Turbera 6	7,5	Minerotrófica Exceso
Turbera 6 D	6,7	Minerotrófica Rica
Turbera 7	7,4	Minerotrófica Exceso
Turbera 9	7,9	Minerotrófica Exceso
Turbera 10	7,8	Minerotrófica Exceso
Turbera 11	6,8	Minerotrófica Rica
Turbera 12	6,6	Minerotrófica Rica

Entre las principales características presentes en estas turberas están el aporte de elementos minerales y agua proveniente de la capa freática, escurrimiento lento, relativamente ácidas, conductividad > 80 iS/cm, $2 < [Ca] < 50$ mg/L, predominio de musgos pardos (familia Amblystegiaceae) y de hierbas (familia Cyperaceae) (Figura 17).



Figura 18. Imágenes de musgo pardo (der) y ciperáceas (izq) en las turberas muestreadas en la cordillera de Talamanca, Costa Rica

El agua de precipitación es pobre en nutrientes y algo ácida. A través del contacto con el suelo mineral/roca de fondo, las propiedades químicas del agua pueden cambiar. Como resultado, las turberas en diferentes entornos hidrogeológicos reciben insumos de agua de diferente calidad (Joosten y Clarke 2002). La presencia de musgos pardos en turberas de Costa Rica y Chile podría explicar el cambio de las propiedades químicas del agua provocando así pH básicos y dando origen a turberas minerotróficas en estos países; además, de los suelos histosoles en ambos sitios.

5.2.2.2. Nivel freático

Los resultados de nivel freático demuestran que las turberas de Costa Rica pasan con un espejo de agua a pesar de las estaciones o fluctuaciones del clima. La presencia de agua ocurre aproximadamente entre 5 a 6 cm de profundidad, dando como resultado agua en la superficie de la turbera. Se encontraron sitios donde la profundidad para observar agua era de aproximadamente de 20 cm (Figura 18).

La permanencia del nivel de saturación en proximidad a la superficie, es decir, no necesariamente debe de haber anegamiento, se puede considerar como una condición favorable para el ecosistema debido a que regula el crecimiento de especies no adaptadas para este ambiente, dando como resultado la imposibilidad de especies invasoras dentro de la misma (Díaz *et al.* 2015).

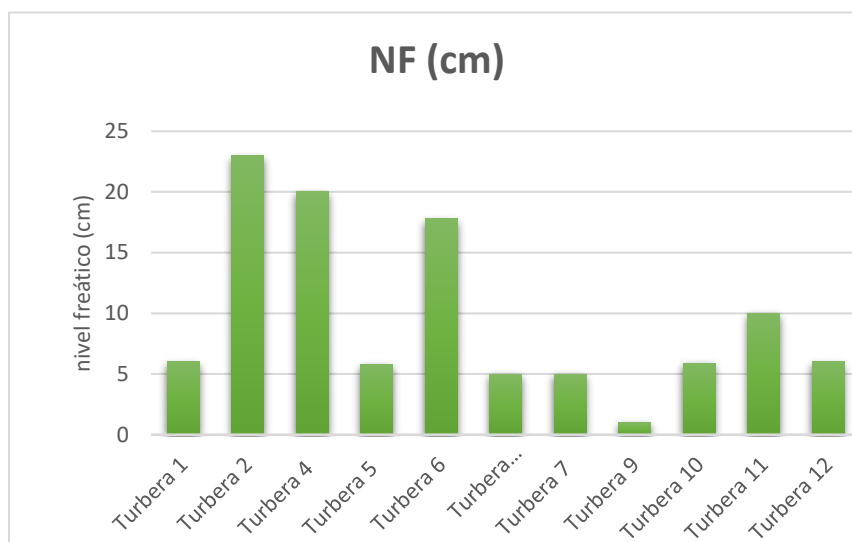


Figura 19. Nivel freático en las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica

5.2.2.3. Profundidad máxima

La medición de la profundidad máxima indicó un promedio general de aproximadamente 194 cm de profundidad de las turberas estudiadas (Figura 19).

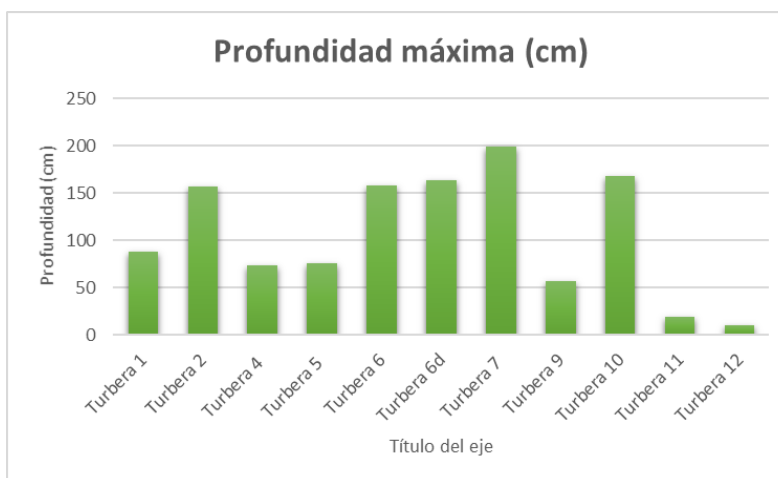


Figura 20. Profundidad máxima en las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica

Las turberas 11 y 12 están ubicadas en trochas dentro de la zona estudiada, las cuales conducen a antenas de alta tensión, por lo que la zona muestra mucha presencia de piedra (Figura 21), lo que dificulta la entrada del "snow probe" y del barreno ruso.



Figura 21. Imagen del perfil de la turbera 12, el área naranja es piedra con arcilla endurecida. Cordillera de Talamanca, Costa Rica

5.3. Carbono almacenado en suelos

Mediante el análisis de modelos lineales y mixtos se demostró que el carbono muestra una relación directa con los perfiles del suelo (15 cm, 30 cm y 50 cm). En la Figura 21 se pueden observar los tres perfiles de suelo estudiados (15 cm, 30 cm y 50 cm). Se observa un aumento conforme se va avanzando en la profundidad del perfil (Cuadro 11). Aproximadamente, entre el perfil 15 y 30 cm, se da un aumento de 274,84 Mg ha⁻¹ y entre el perfil 30 cm y 50 cm de 101,67 Mg ha⁻¹ (Cuadro 10).

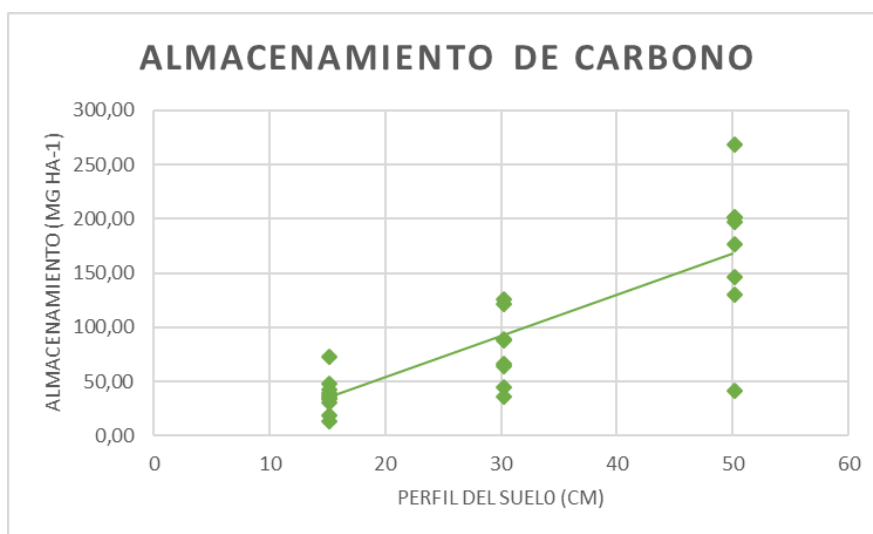


Figura 22. Almacenamiento de carbono (Mg ha⁻¹) a través de perfiles de suelos evaluados en la cordillera de Talamanca, Costa Rica

Cuadro 11. Pruebas de hipótesis secuenciales

Variable	numDF	denDF	F-value	p-value
Perfil (cm)	2	11	25,53	0,0001
pH	1	11	0,96	0,3473
NF (cm)	1	8	0,45	0,5190
Prof (cm)	1	11	4,9E-03	0,9454

Se determinó las concentraciones de carbono hasta la máxima profundidad de penetración del barreno ruso utilizado. La profundidad máxima de muestreo fue de 50 cm, por lo que los datos de carbono se consideran hasta esa profundidad (Cuadro 12). En los casos de las turberas 1 y 11 no se pudo muestrear más de 15 cm debido a que las condiciones del suelo no lo permitieron por motivos de sequedad o presencia de sedimento rocoso lo cual dificultó la entrada del barreno. En estos casos, el valor para la turbera 1 fue de 49,98 Mg ha⁻¹ en los primeros 15 cm del suelo y en la turbera 11 36,35 Mg ha⁻¹.

Cuadro 12. Carbono almacenado (Mg ha⁻¹) en las turberas estudiadas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica, según profundidad

Sitio	Prof 15 cm	Prof 30 cm	Prof 50 cm	Sum
Turbera 1	49,95			49,98
Turbera 2	33,10	89,80	203,93	326,83
Turbera 4	44,37	128,24	270,30	442,90
Turbera 5	36,73	123,73	203,30	363,76
Turbera 6	20,87	90,97	132,57	244,40
Turbera 6D	75,29	46,64	44,06	165,99
Turbera 7	15,97	68,58	148,77	233,32
Turbera 9	41,65	66,35	198,86	306,86
Turbera 10	38,93	38,18	178,45	255,55
Turbera 11	36,35			36,35

En el Cuadro 13 se comparan las concentraciones de carbono obtenidas en este estudio con en otras investigaciones a nivel del trópico considerando información de profundidades similares. Como se puede observar, las turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica, almacena aproximadamente un 31-43% de carbono en sus primeros 50 cm de suelo, mientras que turberas de Indonesia almacenan entre un 55% - 56% en los primeros 20 cm de profundidad; por lo que se podría indicar que las 11 turberas analizadas en este estudio almacenan una cantidad de carbono importante que no está siendo emitido a la atmósfera.

Esta característica de almacenar grandes cantidades de carbono se puede explicar debido a las condiciones presentes en los trópicos tales como: lluvias frecuentes y excesivas, altas precipitaciones y evapotranspiración restringida (entornos montañosos o alpinos, grandes cuencas de captación y retención regular de agua, depresiones del terreno y llanuras de inundación).

Mediante estudios de asociaciones vegetales se pueden determinar las similitudes de familias, especies o clases de plantas en estos ecosistemas, debido a que por lo general las especies que dominan las turberas tropicales tienden a ser dicotiledóneas, palmeras, ciperáceas, gramíneas, musgos, entre otras especies. Esta diversidad de vegetación produce diferentes tipos de turba, que pueden incluir madera, rizomas, herbáceas, raíces y radículas, además de restos de musgos.

Lo cambios en la vegetación debido a las condiciones climáticas de las zonas templadas r podría explicar por qué turberas ubicadas en Europa presentan un almacenamiento de apenas un 0,03 – 0,12%.

Cuadro 13. Comparación de la concentración de carbono almacenado en las turberas de la cordillera de Talamanca (resultados del presente estudio) con los de otros estudios.

Autor	Locación	Rango profundidad (cm)	Concentración carbono (%)
Turberas Tropicales			
Este estudio	Talamanca, Costa Rica	0-50	30,9-43,0
Brady (1997)	Sarawak, Indonesia	0-20 20-40	54,9-56,4
Sajarwan <i>et al.</i> (2002)	Borneo Central, Indonesia	0-50 50-100	41,6-57,7 57,4-58,9
Dradjad <i>et al.</i> (2003)	Borneo Central, Indonesia	0-20 25-50	41,6-57,7 57,4-58,9
Turberas templadas			
Eglessman (1976)	Varias locaciones en Europa		0,03-0,12
Ryden y Jeghum (2006)	Nueva Zelanda	Superficial	0,102 +- 0,0024

5.4. Intercambio de gases efecto invernadero

Variación diaria del CH₄

En la Figura 22 muestra la variación de los flujos de metano a lo largo del día; según se observa, se pueden identificar picos altos de emisiones los cuales coinciden con las horas del día que presentan las temperaturas más altas. Para los tres muestreos, las emisiones más altas fueron a media mañana (12:00 md-1:00 pm), y a pesar de que no se identifica un patrón marcado para los picos bajos, por lo general después del pico alto de la media mañana se da un descenso hasta el final de la tarde; las emisiones más bajas ocurren en horas de la tarde.

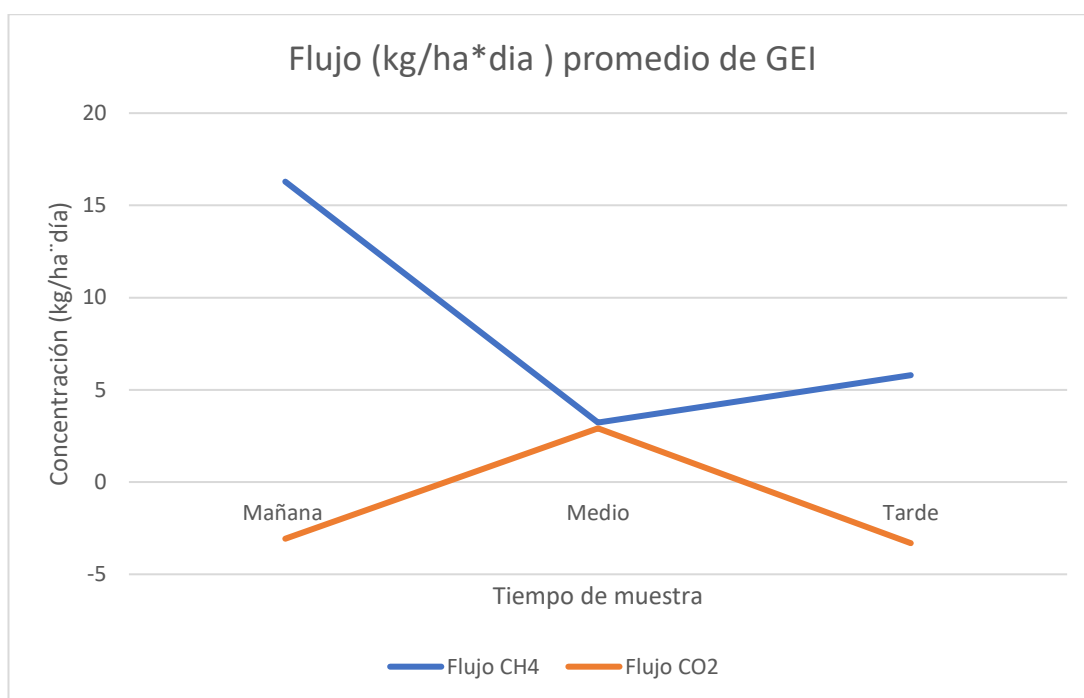


Figura 23. Flujo promedio de GEI en las turberas de la cordillera de Talamanca ($\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

Variación diaria de CO₂

Los flujos de emisiones de CO₂ a lo largo del día en los tres muestreos presentaron sus valores más altos entre las horas del mediodía (12:00 md a 1:00 pm) (Figura 23). Estas horas coinciden con las temperaturas más altas. Así como se pudo observar un periodo de emisiones altas, también se observaron coincidencias en los flujos más bajos, los cuales fueron observados en las horas de la mañana (6:00 a 7:00 am), que estuvo precedido por un descenso gradual de los flujos en la tarde (5:00 pm a 6:00 pm).

Se realizó una prueba de modelos lineales y de correlación para explicar estadísticamente la posible relación entre las emisiones de gas y la temperatura y humedad relativa del sitio debido a que, según la literatura, es la variante con mayor peso sobre los gases (Bartlett y Harriss 1993, Eickenscheidt *et al.*

2015, Jauhiainen *et al.* 2012). Ambas pruebas dieron como resultado que no existe una correlación entre ambas variables ($\text{temp} = 0,3285$ y $\text{pHum} = 0,4211$), lo cual podría deberse a que los datos que se manejan hasta el momento son muy pocos y no permiten establecer esta relación.

Comparación de las emisiones de GEI

Se pueden observar en la figura 23, diferencias entre las emisiones de ambos gases. Así, el CH_4 muestra emisiones mayores debido a que el metano en una turbera está en función de la producción, consumo del perfil, transporte a la atmósfera como difusión o ebullición. Además, la formación de metano está restringida a la parte anóxica del perfil, seguida de la posición real de la mesa de agua (Parish *et al.* 2008, Toprak 1995, Eickenscheidt *et al.* 2015).

En el caso del CO_2 , las emisiones dependen del momento del día; además, la emisión de CO_2 de una turbera incluye respiración autotrófica, regulada por fotosíntesis y temperatura, y respiración heterotrófica, controlada en gran medida por la temperatura del suelo (Parish *et al.* 2008, Page *et al.* 2011, Eickenscheidt *et al.* 2015).

Por ende, se podría deducir que las turberas de Costa Rica presentan sistemas anaeróbicos que fomentan la producción de metano, ya que la turba y la vegetación como musgos fijadores de CO_2 se encuentra cubierto por un nivel freático.

6. Conclusiones

1. Para la elaboración de mapas en sitios montañosos tienden a dificultarse debido al relieve y vegetación en ellos dando como resultado complicaciones para la clasificación. Lo anterior podría mejorar la recolecta de información mediante un trabajo de campo más detallado, tomar en cuenta la complejidad misma del paisaje y utilizar imágenes de resolución espacial mayor. Aumentar el esfuerzo de campo para la captura de datos y complementarlos con tecnologías como la de drones permitirían acceder a sitios más remotos los cuales no pudieron considerarse por motivos logísticos.

2. Las turberas tienden a estar muy extendidas y son muy diversas, y se distribuyen desde el nivel del mar hasta grandes altitudes. Costa Rica no dispone de una información detallada y completa sobre su ubicación y extensión. Por lo que se deben de fomentar esta clase de estudios y análisis cartográficos para obtener información más detallada sobre la ubicación y extensión de estos ecosistemas.

3. Al estar las turberas localizadas en la intersección atmósfera agua-suelo son particularmente sensibles a cambios en cualquiera de estos factores (Turetsky *et al.* 2002, Holden 2005). En el presente estudio, las sinergias de las diferentes actividades humanas (industria, cultivo, expansión urbana), han afectado cada una de las dimensiones de las turberas poniéndolas en grave riesgo, y originando cambios inmediatos en su función ecosistémica cuyo funcionamiento resulta bastante desconocido y más aún su restauración.

4. El cambio climático y la extracción de turba afectan en gran medida la hidrología de las turberas, e indudablemente van a generar cambios en la producción primaria como la descomposición de la turba. En el caso del cambio climático, existe una incertidumbre clave relacionada en cómo la producción de turba y la descomposición de esta cambiará si el clima se vuelve más cálido, lo que dependerá en gran medida de los cambios de la humedad y su amplitud.

5. Cambio de uso de la tierra, como es el caso de turberas con estanques, torres o cemento en ellas, podrían provocar alteraciones en los drenajes dando como resultado la exposición de la turba. Lo anterior genera combustión que libera carbono almacenado a la atmósfera en forma de CO₂. Esta pérdida significativa de carbono hacia la atmósfera es poco probable que se forme

de nuevo después de su emisión. La degradación de las turberas es la responsable de la liberación de aproximadamente 2 a 3 billones de toneladas de CO₂ a la atmosfera.

6. Se deben de fomentar más estudios referentes a asociaciones vegetales, especies claves para las turberas, endemismo de especies y su comportamiento para la formación del ecosistema y su relación con condiciones climáticas de la zona, con el fin de fomentar planes de manejo y conservación en la zona.

7. Las turberas de Costa Rica tienden a emitir más metano que dióxido de carbono, lo que podría deberse a que las turberas se encuentren en estado natural ya que la literatura explica que turberas altamente alteradas liberan más dióxido de carbono debido a que el material orgánico se oxida y se erosiona.

8. En Costa Rica, las estrategias nacionales se han dirigido en mayor medida a fortalecer el sistema de parques nacionales y reservas biológicas, descuidando la definición e implementación de acciones explícitas que aseguren la permanencia de elementos de conservación en áreas protegidas bajo otras categorías de manejo. En este contexto, se deberían dar oportunidades de manejo y gestión de recursos existen usando como mecanismo financiero los servicios ecosistémicos principales de las turberas: acumulación de carbón como materia orgánica y regulación y acumulación de agua.

7. Literatura citada

Anderson, R. 2010. Restoring afforested peat bogs : results of current research. Forest Research Report :1-8.

Artz, R; Chapman, S; Donnelly, D; Matthews, R. 2012. Potential Abatement from Peatland Restoration. (1202):1-9.

Bartlett, KB; Harriss, RC. 1993. Review and Assessment of methane emissions from wetlands. 26:261-320.

Boca, T; Rodríguez, G. (2012). Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos. s.l., s.e.

Brady MA (1997) Effects of vegetation changes on organic matter dynamics in three coastal peat deposits in Sumatra, Indonesia. In: Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands. Proceedings of the International Symposium on Biodiversity, Environmental Importance and Sustainability of Tropical Peat and Peatlands, Palangka Raya, Central Kalimantan, Indonesia, 4-8 September 1995 (eds Rieley JO, Page SE), pp. 113– 134. Samara Publishing Ltd., Cardigan, UK.

Brak, B; Vroklage, M; Cleef, AM. 1902. Comunidades Vegetales de la Turbera de Altura «La Chonta» en Costa Rica. :427.

Bright, JA; Langston, RHW; Bullman, R; Evans, RJ; Gardner, S. 2010. Spatial overlap of wind farms on peatland with sensitive areas for birds (en línea). Mires and Peat 4:Article 7. Disponible en <http://www.mires-and-peat.net/>.

Castillo, F; Chesqorh, W; García, MI; García, M; Martínez, A; Nóvoa, JC; Pontevedra, X; Sahuquillo, A. 2001. Turberas de montaña de Galicia. Martínez-Cortizas, A; Chesworth, W; García-Rodeja, E (eds.). s.l., s.e. 141-148 p.

Castro, M. 2005. Complejo Turbera de la Chonta, Costa Rica. *In Izurieta, X (ed.)*. Andes, s.e. p. 1-7.

Clymo, RS; Turunen, J; Tolonen, K. 1998. Carbon Accumulation in Peatland (en línea). Oikos 81(2):368-388. DOI: <https://doi.org/10.2307/3547057>.

Cooper, A; Mccann, TP; Hamill, B. 2001. Vegetation regeneration on blanket mire after mechanized peat-cutting. *Global Ecology and Biogeography* 10(3):275-289. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1466->

822X.2001.00232.x.

Dawson, JJC; Smith, P. 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment* 382(2-3):165-190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>.

Díaz, MF; Silva, W; León, CA. 2015. Características de los ecosistemas de turberas, factores que influyen en su formación y tipo. s.l., s.e. p. 1-27p.

Dominguez, E; Bahamonde, N; Muñoz-Escobar, C. 2012. Efectos de la extracción de turba sobre la composición y estructura de una turbera de Sphagnum explotada y abandonada hace 20 años, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia* 40(2):37-45. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2012000200003>.

Domínguez, E; Vega-Valdés, D. 2015. Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes. *In Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike (ed.)*. Chile, s.e. p. 334.

Dradjad M, Soekodarmodjo S, Hidayat MS, NitisaptoM(2003) Subsidence of peat soils in the tidal swamplands of Barambai, South Kalimantan. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 4, 32–40.

Eggesmann R (1976) Peat consumption under influence of climate, soil condition and utilization. *Proceedings of the 5th International Peat Congress, Poznan, Poland, 21– 25 September, 1976*. Vol. 1, pp. 233–247. International Peat Society, Jyva"skylä", Finland.

Eickenscheidt, T; Heinichen, J; Drösler, M. 2015. The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content. *Biogeosciences* 12:5161-5184. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-12-5161-2015>.

Evans, C; Woodin, S; Lindsay, R. 2016. Atmospheric Pollution (en línea). IUCN UK Committee Peatland Programme 1 edition(13):1-5. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802287>.

Forster, P; Ramaswamy, V; Artaxo, P; Berntsen, T; Betts, R; Fahey, DW; Haywood, J; Lean, J; Lowe, DC; Myhre, G; Nganga, J; Prinn, R; Raga, G; Schulz, M; Dorland, R Van. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (en línea). s.l., The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, vol.30. p. 129-234 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.220407>.

Glaves, D; Morecroft, M; Fitzgibbon, C; Owen, M; Phillips, S; Leppitt, P. 2013. The effects of managed burning on upland peatland biodiversity , carbon and water (NEER004). s.l., s.e. 1-156 p.

Gómez, L.D. 1984. Las Plantas Acuáticas y Anfíbias de Costa Rica y Centroamérica. I. Liliopsida. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José. 430 pp.

Gómez, L.D. y W. Herrera. 1993. Mapa de Unidades Bióticas de Costa Rica. Escala 1:685.000. San José.

Gorham, E. 1991. Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecological Applications* 1(2):182-195. DOI: <https://doi.org/10.2307/1941811>.

Greenpeace. s. f. Indonesia's Forests: Under Fire. .

Guo, Q; Kelly, M; Gong, P; Liu, D. 2007. An Object-Based Classification Approach in Mapping Tree Mortality Using High Spatial Resolution Imagery (en línea). *GIScience & Remote Sensing* 44(1):24-47. DOI: <https://doi.org/10.2747/1548-1603.44.1.24>.

Holden, J. 2005. Peatland hydrology and carbon release: why small-scale process matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363(1837):2891-2913. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1671>.

Hoyos-Santillan, J; Lomax, BH; Large, D; Turner, BL; Boom, A; Lopez, OR; Sjögersten, S. 2016. Quality not quantity: Organic matter composition controls of CO₂ and CH₄ fluxes in neotropical peat profiles. *Soil Biology and Biochemistry* 103:86-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.017>.

IPCC. 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. s.l., s.e. 354 p.

IPS. 2008. Peatlands and climate change. Strack, M (ed.). Canada, ISP. 98–122. p. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>.

Islebe, G.A. y H. Hooghiemstra. 1997. A contribution to the Late Quaternary of Costa Rica. *Quaternary Science Reviews* 16: 587-604.

Iturraspe, R. 2010. Las turberas de Tierra del Fuego y el Cambio Climático global (en línea). s.l., s.e. 32 p. Disponible en <http://www.wetlands.org/LinkClick.aspx?fileticket=racaH0t+CLw=&tabid=56>.

Jauhiainen, J; Hooijer, A; Page, SE. 2012. Carbon dioxide emissions from an Acacia plantation on

peatland in Sumatra , Indonesia. Biogeosciences 9:617-630. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-9-617-2012>.

Jiménez, A; Sotolongo, R; García, MR; Blen, MC; Sánchez, NI. 2010. Evaluación de la composición y estructura del bosque semideciduo en la Región Montañosa de Soroa. Lantindex, Agris 29(1988):1-10.

Joint Nature Conservation Committee. (2011). Towards an assessment of the state of UK Peatlands. s.l., s.e.

Joosten, H. 2009. The Global Peatland CO2 Picture. Africa :11.

Joosten, H. 2015. Peatlands, climate change mitigation and biodiversity conservation. :14.

Joosten, H; Clarke, D; International Peat Society; International Mire Conservation Group. 2002. Wise use of mires and peatlands: background and principles including a framework for decision-making (en línea). s.l., s.e. 304 p. Disponible en http://www.peatlands.org/sites/default/files/files/WUMP_Wise_Use_of_Mires_and_Peatlands_book.pdf.

Joosten, H; Tapio-Biström, M-L; Tol, S. 2012. Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use (en línea). s.l., s.e. 1-100 p. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/015/an762e/an762e.pdf>.

Kauffman, BJ; Donato, D; Adame, MF. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Bogor, Indonesia: CIFOR. :117.

Kimmel, K; Mander, U. 2010. Ecosystem services of peatlands: Implications for restoration. Progress in Physical Geography 34(4):491-514. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133310365595>.

Lachniet, MS; Seltzer, GO. 2002. Late Quaternary glaciation of Costa Rica. (5):547-558.

Landry, J; Rochefort, L. 2012. THE DRAINAGE OF PEATLANDS: impacts and rewetting techniques (en línea). :1-62. Disponible en http://www.gret-perg.ulaval.ca/uploads/tx_centrecherche/Drainage_guide_Web.pdf.

Lapveteläinen, T; Pipatti, R. 2008. PEAT IN INTERNATIONAL CLIMATE CHANGE CONVENTIONS. *In Strack, M (ed.)*. s.l., IPS. p. 211-223.

Limpens, J; Berendse, F; Blodau, C; Canadell, JG; Freeman, C; Holden, J; Roulet, NT; Rydin, H;

Schaepman-Strub, G. 2008. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications - a synthesis. (en línea). *Biogeosciences* 5:1475-1491. DOI: <https://doi.org/10.5194/bgd-5-1379-2008>.

Lindsay, R a; Charman, DJ; Everingham, F; Reilly, RMO; Palmer, M a; Rowell, T a; Stroud, D a. 1988. Part I: Peatland ecology. *The Flow Country: The peatlands of Caithness and Sutherland* :5-32.

Lindsay, R; Birnie, R; Clough, J. 2014. IUCN UK Committee Peatland Programme, Briefing Note 1, Peat Bog Ecosystems: Key Definitions. (1):1-8.

Lindsay, R; Birnie, R; Clough, J. 2014. Peat bog ecosystems: key definitions. :56.

Littlewood, N; Anderson, P; Artz, R; Bragg, O; Lunt, P; Land, M. 2010. Peatland Biodiversity. *Scientific Review* (December):1-35.

Marsden, K; Ebmeier, S. 2012. Peatlands and Climate Change (en línea). s.l., s.e. 34 p. Disponible en <http://www.peatsociety.org/sites/default/files/files/PeatlandsandClimateChangeBookIPS2008.pdf#page=125>.

Martínez Cortizas, A; García-Rodeja Gayoso, E. 2009. Turberas, turberas bajas y áreas pantanosas. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España :7.

Matteucci, SD; Scientific, N. 2015. Metodología para el estudio de la vegetación / por Silvia D . (September).

Minayeva, T; Sirin, A. 2012. Peatland biodiversity and climate change (en línea). *Biology Bulletin Reviews* 2(2):164-175. DOI: <https://doi.org/10.1134/S207908641202003X>.

Moore, TR; Knowles, R. 1989. The Influence of Water Table Levels on Methane and Carbon Dioxide Emissions From Peatland Soils. 38:33-38.

Moss, R. 2006. Guía de identificación y manejo para humedales en propiedades privadas en Costa Rica. s.l., s.e. 1-52 p.

Natural England. 2007. England 's peatlands : carbon storage and greenhouse gases. (1995):21-33.

Olofsson, P; Foody, GM; Herold, M; Stehman, S V; Woodcock, CE; Wulder, MA. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change (en línea). *Remote Sensing of Environment* 148:42-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

Page, SE; Rieley, JO; Banks, CJ. 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17(2):798-818. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>.

Parish, F; Sirin, A; Charman, D; Joosten, H; Minayeva, T; Silvius, M; Stringer, L. 2008. Assessment on Peatland, Biodiversity and Climate Change (en línea). s.l., s.e., vol.1. 1-206 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

_____. 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report (en línea). s.l., s.e. 1-206 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Parra, R; Apaza, G; Agromont, A. 2010. ESTIMACION DE FACTORES DE EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Revista Boliviana de Química* 27(2):81-88.

Pérez, S., A. Alvarado y E. Ramírez. 1978. Mapa de Asociaciones de Subgrupos de Suelos de Costa Rica. Escala 1:200.000. OPSA. IGN-MAG-FAO. San José.

Rieley, J. 2014. Utilization of peatlands and peat. s.l., s.e. p. 22-26.

Rieley, JO; Wüst, RAJ; Jauhiainen, J; Page, SE; Wösten, H; Hooijer, A; Siegert, F; Limin, SH; Vasander, H; Stahlhut, M. 2008. TROPICAL PEATLANDS: CARBON STORES, CARBON GAS EMISSIONS AND CONTRIBUTION TO CLIMATE CHANGE PROCESSES. s.l., s.e. p. 148-181.

Roig, C; Roig, F. 2004. Los Turbales de la Patagonia. Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad. *In Blanco, D & Balze, V (ed.)*. Buenos Aires, s.e. p. 5-49.

_____. 2009. Consideraciones Generales. s.l., s.e. p. 1-1.

Roulet, NT; Lafleur, PM; Richard, PJH; Moore, TR; Humphreys, ER; Bubier, J. 2007. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology* 13(2):397-411. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01292.x>.

RSPB Scotland. 2011. Realising the Benefits of Peatlands Overcoming policy barriers to peatland restoration Realising the Benefits of Peatlands. RSPB Scotland. :17.

Runkle, B; Kutzbach, L. 2014. Towards climate-responsible peatlands management (en línea). *In Biancalani, R; Avagyan, A (eds.)*. s.l., s.e. p. 6-11. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i4029e.pdf>.

Sajarwan A, Notohadiprawiro T, Radjagukguk B, Hastuti S (2002) Diversity of tropical

peat characteristics in intact peatland forest, under the influence of forest type, peat thickness, and position of peat deposit. In: Peatlands for People: Natural Resource Functions and Sustainable Management. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland, Jakarta, Indonesia (eds Rieley JO, Page SE, Setiadi B), pp. 119–124.

Sánchez, L. (2004). Ficha informativa de los humedales de RAMSAR Turberas de Tamanca. 7. s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). Manual de la Convención de Ramsar , 6ª edición. s.l., s.e.

Sjörs, H. 1950. On the Relation between Vegetation and Electrolytes in North Swedish Mire Waters. Nordic Society Oikos 2:241-258.

Soler, PE; Berroterán, JL; Gil, JL; Acosta, RA. 2013. Arrabidaea pubescens (37.2), Myrospermum frutescens (22.8), Randia spinosa (21.7), and Guazuma ulmifolia (19.9). In the shrubland, Combretum fruticosum (60.2), Mimosa tenuiflora. Agronomía Trop 62(4):25-37.

Stark, S; Ylänne, H. 2015. Grazing in Arctic peatlands—an unknown agent in the global carbon budget (en línea). Environmental Research Letters 10(5):051002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/051002>.

Stroud, DA; Reed, TM; Pienkowski, MW; Lindsay, RA; Ratcliffe, EDA; Oswald, PH. 1987. Birds , bogs and forestry The peatlands of Caithness and Sutherland. .

Taylor, K. 2015. Good Practice during Wind Farm Construction (en línea). (September):1-80. Disponible en file:///Users/Rodrigo/Dropbox (Personal)/Library.papers3/Files/70/706E8C33-19D6-4CAB-AB93-98F91030A892.pdf%5Cpapers3://publication/uuid/D69A61ED-8794-4E27-9EC6-4E08ECBDAB3E.

Toprak, H. 1995. TEMPERATURE AND ORGANIC LOADING DEPENDENCY OF METHANE AND CARBON DIOXIDE EMISSION RATES OF A FULL-SCALE ANAEROBIC WASTE STABILIZATION POND. Elsevier Science 29(4):1111-1119.

De VleeSchouwer, F; Le Roux, G; Shotyk, W. 2010. Peat as an archive of atmospheric pollution and environmental change: A case study of lead in Europe. PAGES Magazine 18(1):20-22.

Worrall, F; Chapman, P; Holden, J; Evans, C; Artz, R; Smith, P; Grayson, R. 2010. Peatlands and Climate Change. Report to IUCN UK Peatland Programme. IUCN UK Peatland Programme (December):1-

15.

Worrall, F; Clay, G; Marrs, R; Reed, M. 2010. Impacts of Burning Management on Peatlands (en línea). s.l., s.e. 1-41 p. Disponible en <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Impacts+of+Burning+Management+on+Peatlands#1>.

Wu, J; Zhang, J; Jia, W; Xie, H; Gu, RR; Li, C; Gao, B. 2009. Impact of COD / N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresource Technology* 100:2910-2917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.056>.

Wu, Y; Blodau, C. 2013. PEATBOG: A biogeochemical model for analyzing coupled carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands. *Geoscientific Model Development* 6(4):1173-1207. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1173-2013>.

Yeloff, DE; Labadz, JC; Hunt, CO. 2006. Causes of degradation and erosion of a blanket mire in the southern Pennines , UK. *Mires and Peat* 1:1-18.

Yu, Z. 2011. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications (en línea). *The Holocene* 21(5):761-774. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683610386982>.

ANEXOS

Anexo 1. Lista de especies encontradas en las turberas de Talamanca, Costa Rica

Familia	Especie	Hábito	GRUPO
Adoxaceae	<i>Viburnum costaricanum</i>	Arbusto	DICOT
Alstroemeriaceae	<i>Bomarea hirsuta</i>	Arbusto	MONOCOT
Araliaceae	<i>Oreopanax nubigenus</i>	Árbol	DICOT
	<i>Schefflera rodriguesiana</i>	Árbol	DICOT
Asteraceae	<i>Senecio costaricensis</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Ageratina reticulata</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Diplosthepium costaricensis</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Ageratina pichinchensis</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Ageratina reticulifera</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Ageratina phanerandra</i>	Arbusto	DICOT
Blechnaceae	<i>Blechnum buchtienii</i>	Arbusto	FERN
	<i>Blechnum chiriquanum</i>	Helecho	FERN
Bromeliaceae	<i>Puya dasylirioides</i>	Hierba	MONOCOT
Clusiaceae	<i>Clusia</i> sp.	Árbol	DICOT
	<i>Hypericum strictum</i>	Hierba	DICOT
Cyperaceae	<i>Carex bonplandii</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Carex donnell-smithii</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Carex</i> sp.	Hierba	MONOCOT
	<i>Rhynchospora macrochaeta</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Rhynchospora ruiziana</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Rhynchospora schaffneri</i>	Hierba	MONOCOT
Dennstaedtiaceae	<i>Eleocharis</i> sp.	Hierba	MONOCOT
	<i>Pteridium aquilinum</i>	Helecho	FERN
Dennstaedtiaceae	<i>Pteridium arachnoideum</i>	Helecho y afines	FERN
	<i>Gaultheria gracilis</i>	Arbusto	DICOT
Ericaceae	<i>Disterigma humboldtii</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Cavendishia bracteata</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Disterigma bracteata</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Pernettya prostrata</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Pernettya Coriacea</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Disterigma humboldtii</i>	Hierba	DICOT
	<i>Vaccinium consanguineum</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Gaultheria gracilis</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Macleania insignis</i>	Epífita	DICOT
	<i>Paepalanthus costaricensis</i>	Hierba	MONOCOT
Eriocaulaceae	<i>Paepalanthus costaricensis</i>	Hierba	MONOCOT
Grossulariaceae	<i>Escallonia myrtilloides</i>	Árbol	DICOT
Hymenophyllaceae	<i>Hymenophyllum</i> sp.	Hierba	FERN
Juncaceae	<i>Juncus effusus</i>	Hierba	MONOCOT

Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	Árbol	DICOT
Myrtaceae	<i>Ugni myricoides</i>	Árbol	DICOT
Orobanchaceae	<i>Castilleja iraziüensis</i>	Arbusto	DICOT
Osmundaceae	<i>Osmunda regalis</i>	Helecho	FERN
Piperaceae	<i>Peperomia tetraphylla</i>	Hierba	DICOT
Plagiogyriaceae	<i>Plagiogyria semicordata</i>	Helecho	FERN
Poaceae	<i>Chusquea</i> sp.	Hierba	MONOCOT
Polygalaceae	<i>Monnina pittieri</i>	Arbusto	DICOT
Primulaceae	<i>Myrsine</i> sp.	Arbusto	DICOT
Pteridaceae	<i>Llavea</i> sp.	Arbusto	FERN
Rosaceae	<i>Rubus glaucus</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Rubus eriocarpus</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Rubus urticifolius</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Rubus adenotrichus</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Hesperomeles heterophylla</i>	Arbusto	DICOT
	<i>Zanthoxylum melanostictum</i>	Árbol	DICOT
Smilacaceae	<i>Smilax</i> sp.	Arbusto	MONOCOT
Winteraceae	<i>Drimys granadensis</i>	Árbol	DICOT
Xyridaceae	<i>Xyris subulata</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Xyris nigrescens</i>	Hierba	MONOCOT
¿?	<i>Montiralia lirmipes</i>	Arbusto	
Rhamnaceae	<i>Frangula circumscissa</i>	Arbusto	DICOT
Betulaceae	<i>Alnus acuminata</i>	Árbol	DICOT
Orchidaceae	<i>Stelis</i> sp.	Epífita	MONOCOT
Poaceae	<i>Agrostis toluensis</i>	Hierba	MONOCOT
	<i>Cortaderia nitida</i>	Hierba	MONOCOT
Polygalaceae	<i>Monnina saprogena</i>	Hierba	DICOT