

Artículo Original

Densidad aparente y concentración de materia orgánica en el suelo de un humedal de alta montaña¹

Juliana Marulanda A.², Jorge A. Villa³

Artículo recibido: 01 de marzo de 2015 / Artículo Aceptado: 28 de mayo de 2015

RESUMEN

Introducción. los humedales tienen gran importancia ecológica. Uno de sus principales servicios ambientales consiste en la captura y almacenamiento de carbono en su suelo en forma de materia orgánica. Las grandes reservas de carbono almacenadas en los humedales hacen que sean importantes para la reducción de dióxido de carbono atmosférico (CO₂) y a su vez ayudan a mitigar el calentamiento global. **Objetivo.** el objetivo de este trabajo es determinar la densidad aparente y la concentración de materia orgánica en el suelo de un humedal tropical de alta montaña. **Metodología.** se colectaron muestras inalteradas de suelo a lo largo de dos gradientes de niveles de agua (A y B). En cada uno se colectaron muestras inalteradas de suelo de hasta 60 cm en tres puntos diferentes que representan una variación gradual en el nivel del agua. Se calculó la densidad aparente para cada núcleo de suelo colectado y se estimó el contenido de materia orgánica por medio del método de pérdida por ignición LOI. Los datos se analizaron en el programa estadístico SPSS Statistics 20. **Resultados.** los resultados demuestran concentraciones significativas de materia orgánica en los dos gradientes muestreados en el humedal, siendo los puntos denominados en ambos gradientes como seco e intermedio, donde se obtuvo una mayor concentración de materia orgánica sin diferencia estadística significativa entre ellos. **Conclusiones.** se evidenció que el nivel del agua juega un papel importante en la densidad aparente y la concentración de materia orgánica en el ecosistema estudiado.

1 Artículo derivado del proyecto de investigación: "Acumulación de carbono y emisiones de metano en un humedal de alta montaña del páramo de Belmira". Financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS). Periodo: agosto de 2015 a febrero de 2016. Lugar de realización: Humedal La Ciénaga en el Páramo de Belmira.

2 Estudiante de último semestre del pregrado en Ingeniería Ambiental, integrante del semillero de investigación SIGMA de la Corporación Universitaria Lasallista. jumaruldan@ulasallista.edu.co

3 Ingeniero Ambiental. PhD. en Ciencias Ambientales. Docente Investigador. The Ohio State University-USA. jorgevilla@yahoo.com

Autor para correspondencia: jorgevilla@yahoo.com

Palabras clave: humedal, gradiente, densidad, carbono, calentamiento global.

Apparent density and concentration of organic matter in the soil of a high mountain wetland

▣ ABSTRACT

Introduction. Wetlands are very important, under an ecological point of view. One of its main environmental services is the catching and storage of carbon in its soil, as organic matter. The big carbon reserves stored in wetlands make them important for reducing carbon dioxide in the atmosphere (CO₂) and also reduce global warming. **Objective.** Determine the apparent density and the concentration of organic matter in the soil of a high mountain wetland. **Methodology.** Unaltered samples of the soil throughout two water level gradients (A and B) were collected. Unaltered soil samples up to 60 cm were collected in each one, in three different points that represent a gradual variation in the water level. The apparent density was calculated for every soil nucleus collected and the content of organic matter was estimated by means of the loss on ignition method (LOI). The data were analyzed in the SPSS Statistics 2.0 software. **Results.** The results demonstrate significant reductions of organic matter in both gradients, being the points denominated as dry and intermediate the ones in which higher organic matter concentrations with

no significant statistic difference between them was found. **Conclusions.** The water level plays an important role in the apparent density and the organic matter concentration in the ecosystem studied.

Keywords: wetland, gradient, density, carbon, global warming.

Densidade aparente e concentração de matéria orgânica no solo de uma zona úmida de alta montanha

▣ RESUMO

Introdução. As zonas úmidas têm grande importância ecológica. Um dos seus principais serviços ambientais consiste na captura e armazenamento de carbono no seu solo em forma de matéria orgânica. As grandes reservas de carbono armazenadas nas zonas úmidas fazem que sejam importantes para a redução de dióxido de carbono atmosférico (CO₂) e a sua vez ajudam a mitigar o aquecimento global. **Objetivo.** O objetivo deste trabalho é determinar a densidade aparente e a concentração de matéria orgânica no solo de uma zona úmida tropical de alta montanha. **Metodologia.** Se coletou amostras inalteradas do solo ao longo de dois gradientes de níveis de água (A e B). Em cada um se coletou amostras inalteradas do solo de até 60 cm em três pontos diferentes que representam uma variação gradual no nível da água. Se calculou a densidade aparente para

cada núcleo de solo coletado e se estimou o conteúdo de matéria orgânica por meio do método de perda por ignição LOI. Os dados se analisaram no programa estatístico SPSS Statistics 20. **Resultados.** Os resultados demonstram concentrações significativas de matéria orgânica nos dois gradientes mostrados na zona úmida, sendo os pontos denominados em ambos gradientes como seco e intermédio, onde se obteve uma maior concentração de matéria orgânica sem diferença estatística significativa entre eles. **Conclusões.** Se evidenciou que o nível da água joga um papel importante na densidade aparente e a concentração de matéria orgânica no ecossistema estudado.

Palavras chave: zona úmida, gradiente, densidade, carbono, aquecimento global.

■ INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas típicos de las altas montañas de la cordillera de Los Andes, en ellos nace un gran número de corrientes de agua que abastecen a un importante número de poblaciones andinas (Vuille & Urrutia, 2009). Los páramos se caracterizan por presentar bajas temperaturas, con una temperatura promedio anual inferior a 10°C en alturas por debajo de los 3600 m.s.n.m., e inferior a 8°C por encima de dicha altitud (Cárdenas & Cleef, 1996). También se caracterizan por ser ecosistemas bastante húmedos y pantanosos debido a las frecuentes lluvias y a la presencia usual de neblina (Cleef, 2013). Además de su incidencia en la regulación y abastecimiento hídrico (Benavides Duque, 2013), los páramos también ofrecen otros importantes servicios ecosistémicos, como la oferta de

hábitats para numerosas especies, muchas de ellas endémicas (Frolking & Roulet, 2007).

Los humedales de los páramos o de alta montaña son unos de los menos estudiados en el trópico a pesar de su importancia ecológica. Algunos de los procesos que ocurren naturalmente en estos ecosistemas, resultan en la captura de dióxido de carbono (CO₂) en forma de materia orgánica (fotosíntesis), y su posterior almacenamiento en el suelo cuando el material vegetal se muere o cae por senescencia (Sandoval, Zúñiga, Torres & Peña Salamanca, 2009).

Este conjunto de procesos se conoce como captura de carbono y se da usualmente cuando los humedales no están perturbados y las entradas de carbono al sistema son mayores que sus salidas (i.e. descomposición) (Hribljan et al., 2015). En consecuencia, estos ecosistemas funcionan como sumideros de energía radiativa al almacenar carbono en sus suelos, contribuyendo así al enfriamiento de la tierra (Frolking & Roulet, 2007).

A pesar de esta importante función, las cantidades de carbono almacenado en los humedales de alta montaña y su variación espacial permanecen poco estudiadas (Buytaert, Cuesta Camacho, & Tobón, 2011). A nivel mundial, el carbono almacenado en humedales es tan grande que hace que los humedales sean importantes para la mitigación del cambio climático (Murdiyarsa et al., 2009). Los humedales almacenan aproximadamente entre el 15 y el 30% de las reservas terrestres de carbono en su suelo en forma de materia orgánica (i.e. turba) (Limpens et al., 2008).

Pese la existencia de lineamientos y esfuerzos nacionales e internacionales para consolidar

la protección y manejo de los humedales, como la política RAMSAR; en Colombia las políticas existentes evidencian un amplio desconocimiento de la importancia que tienen estos ecosistemas, dado que los argumentos científicos en relación con los efectos del cambio climático son en muchas ocasiones débiles e insuficientes.

Por esta razón el estudio de los reservorios de carbono y sus dinámicas en el tiempo son de vital importancia para el diseño de políticas y planes de manejo cuyo objetivo sea la conservación de estos importantes ecosistemas y los servicios que ofrecen. También para generar políticas que deben estar sustentadas en estrategias claras de mitigación y adaptación al cambio climático. El objetivo de este estudio fue determinar la variación de la densidad aparente y la concentración de materia orgánica en el suelo a lo largo de un gradiente de niveles del agua en un humedal de alta montaña del páramo de Belmira. La hipótesis bajo la cual se desarrolló este estudio fue que

entre más elevado es el nivel del agua (i.e. proxy del contenido de humedad), mayor es el contenido de materia orgánica. Esto en respuesta a la predominancia de condiciones anóxicas y la consecuente disminución de la descomposición.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El sitio de estudio corresponde a un humedal de alta montaña ubicado en el páramo de Santa Inés, municipio de Belmira, norte del departamento de Antioquia (figura 1). Este humedal es conocido localmente como La Ciénaga ($06^{\circ} 40' 54''$ N, $75^{\circ} 40' 37.6''$ W) y se encuentra a una altura aproximada de 3200 m.s.n.m en la cabecera de dos corrientes de agua. Debido a su posición en el paisaje, este humedal recibe y almacena agua lluvia, la cual es la principal fuente de entradas de agua a la cuenca que abastece el humedal.

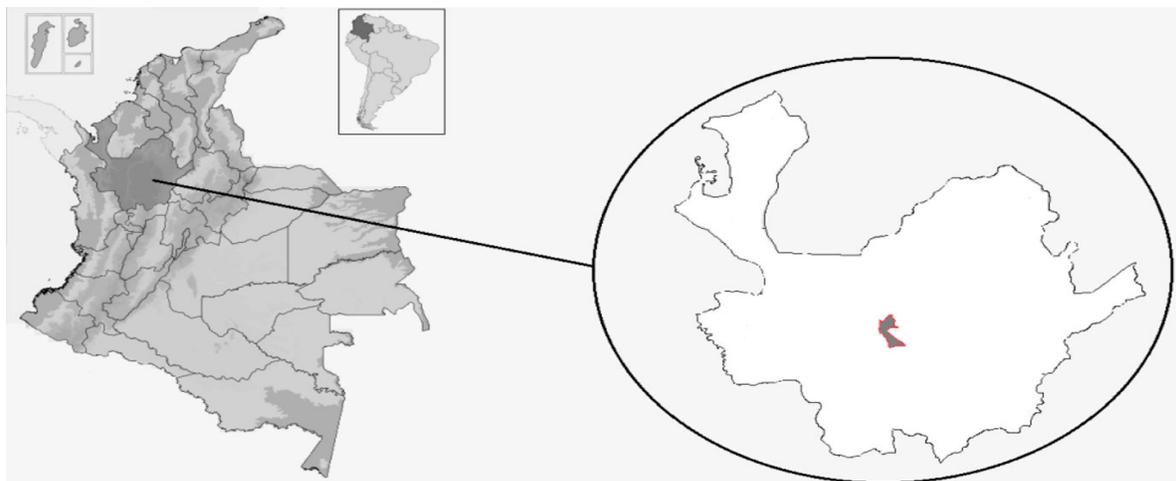


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Belmira

Métodos en campo

Para la determinación de la densidad aparente y de la concentración de materia orgánica, se colectaron muestras inalteradas de suelo a lo largo de dos gradientes de niveles de agua (i.e. gradientes A y B). En cada gradiente se establecieron tres puntos de medición de los niveles del agua, que representan condiciones secas, intermedias y saturadas. Estas condiciones corresponden a niveles del agua de 12 y 4 cm por debajo de la superficie del suelo respectivamente para las condiciones secas e intermedias, y de 70 cm por encima de la superficie del suelo para la condición de saturación.

La extracción de las muestras se hizo según el método empleado por Villa & Mitsch (2014a), utilizando el mismo muestreador universal de sedimentos (WaterMark). Dicho muestreador está compuesto de un tubo de policarbonato transparente de aproximadamente 6,5 cm de diámetro interno acoplado a una cabeza con un pistón mecánico. Este pistón permite la evacuación del aire al momento de introducir el muestreador en el suelo y genera succión en el momento de retirarlo, lo que evita que el suelo colectado se caiga por la acción de la gravedad. El tubo transparente permite verificar la no compresión de las muestras. Las muestras se tomaron hasta una profundidad aproximada de 60 cm. Luego los núcleos se retiraron cuidadosamente del tubo, seccionados en incrementos de 2 cm. Cada incremento fue empacado, sellado y etiquetados con un código correspondiente al incremento del perfil, para ser transportado al Laboratorio Ambiental de la Corporación Universitaria Lasallista donde fueron procesados y analizados.

Análisis de laboratorio

Cada muestra se depositó en recipientes de aluminio previamente pesados, para ser secadas en estufa a 55°C durante 48 horas. Luego se registró el peso seco y se calculó la densidad aparente teniendo en cuenta su volumen, según el diámetro del muestreador y la altura del incremento (i.e. 6.5 cm y 2 cm, respectivamente) (Hribljan et al., 2015; Villa & Mitsch, 2014a). Una vez secas, las muestras se maceraron y homogenizaron hasta obtener partículas de aproximadamente 2 mm. En este proceso se retiraron las raíces presentes. Finalmente se estimó el contenido de materia orgánica usando el método de pérdida por ignición LOI (*Loss On Ignition*), siguiendo el protocolo descrito por Heiri, Lotter & Lemcke (2001).

Primero se pesó 1 g de suelo en un crisol de porcelana y se calentó en la estufa a una temperatura constante de 55°C durante 12 horas para retirar la humedad que las muestras pudiesen haber ganado durante el proceso de homogenización o de almacenamiento. Después se dejaron enfriar en un desecador y se registró su peso (i.e. DW_{55}). A continuación se sometió la muestra a 550°C durante 2 horas en la mufla, luego se retiró y se dejó enfriar en un desecador, para obtener el nuevo peso (i.e. DW_{550}). Todas las muestras se pesaron con balanza analítica de 5 cifras decimales (Abella & Zimmer, 2007; Salehi, Beni, Harchegani & Borujeni, 2011; J. Wang, Wang & Zhang, 2013).

Se utilizó la ecuación 1 para estimar el porcentaje de materia orgánica total.

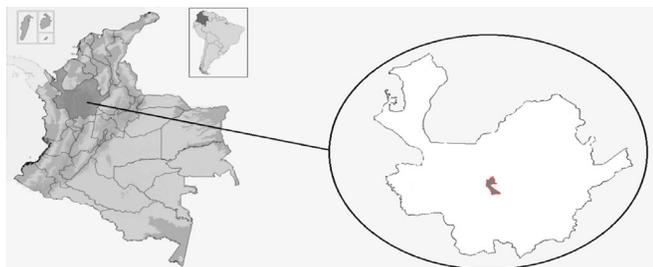


Figura 1. Esquema de trabajar el modelamiento de los juegos tradicionales en Semillero AGLAIA.

$$\% LOI_{550} = \frac{DW_{55} - DW_{550}}{DW_{55}} * 100$$

Ecuación 1,

Donde:

$\% LOI_{550}$ indica el porcentaje de materia orgánica total evaluada a 550°C, DW_{55} indica el peso seco del suelo después de haber retirado la humedad y obtenido un peso contante, sometiendo la muestra a 55°C (g) y DW_{550} es el peso seco del suelo después de la combustión a 550°C (g).

Análisis de datos

Para comparar las concentraciones de materia orgánica por nivel de inundación y por gradiente se utilizaron datos pareados a una profundidad de 40 cm en cada uno de los puntos de muestreo (i.e. 20 datos por cada punto). Los datos se analizaron en el programa estadístico SPSS Statistics 20. Primero se realizó una prueba Shapiro-Wilk, para determinar la normalidad de los datos. Como solo los puntos de muestreo seco e intermedio del gradiente B tenían concentraciones de materia orgánica que se distribuían normalmente se continuaron los

análisis con pruebas no paramétricas.

Para la comparación se utilizó primero la prueba Kruskal-Wallis para encontrar diferencias entre los tres sitios y la prueba U de Mann Whitney para identificar cuáles de los sitios presentaban diferencia. Ambas pruebas se hicieron con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$).

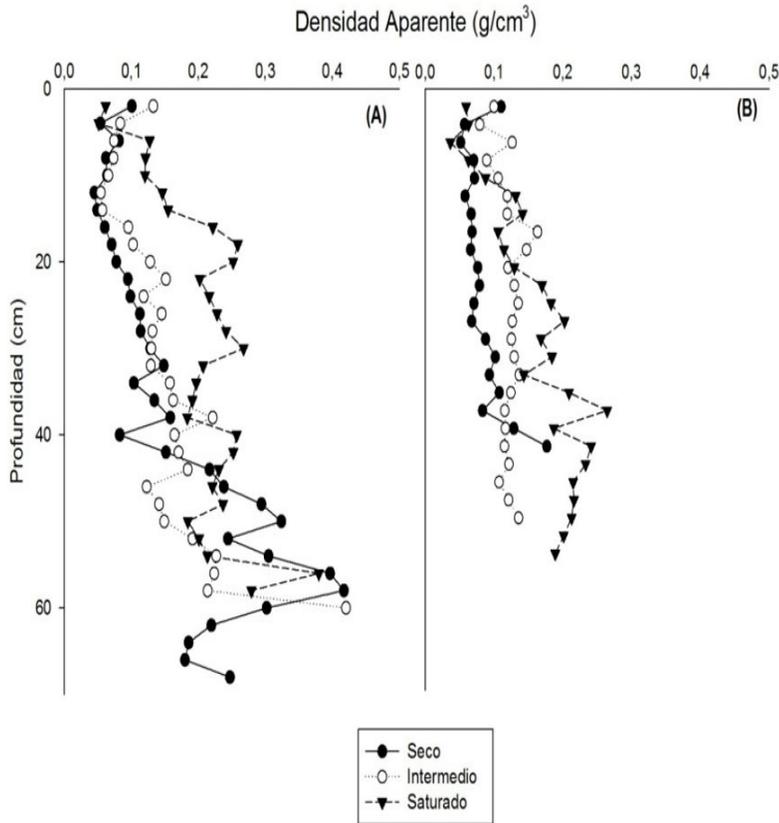
RESULTADOS

Densidad aparente

La densidad aparente fue baja en el perfil muestreado (i.e. $<1 \text{ g/cm}^3$). El gradiente que presenta menor densidad aparente, en valores por profundidad y en cuanto a variabilidad a lo largo del perfil es el B (figura 2). Los puntos de muestreo con menor densidad aparente fueron el seco y el intermedio en ambos gradientes (tabla 1).

Tabla 1. Valores de densidad aparente en cada punto de muestreo del gradiente A y B.

Puntos de muestreo	Profundidad (cm)	Media (g/cm ³)	Mediana (g/cm ³)	Desviación Estándar
Gradiente A				
Seco	68	0.16	0.13	0.10
Intermedio	60	0.15	0.14	0.07
Saturado	58	1.20	0.21	0.07
Gradiente B				
Seco	40	0.08	0.07	0.03
Intermedio	48	0.12	0.12	0.02
Saturado	52	0.16	0.18	0.06



Concentración de materia orgánica

Cuando se juntan los gradientes A y B, la media de la concentración de la materia orgánica [%] para los niveles de agua seco, intermedio y saturado son 71.0, 73.8 y 62.9, los valores para la mediana son 70.2, 72.2 y 65.2 respectivamente. Los valores de materia orgánica son diferentes entre los tres niveles de inundación, ($p = <0.001$; según la prueba Kruskal-Wallis). El análisis post-hoc con la prueba de Mann-Whitney indica que el nivel saturado es el que presenta diferencias con los demás niveles (figura 3).

Figura 2. Perfil de densidades aparentes del suelo para cada punto de muestreo del gradiente A y B

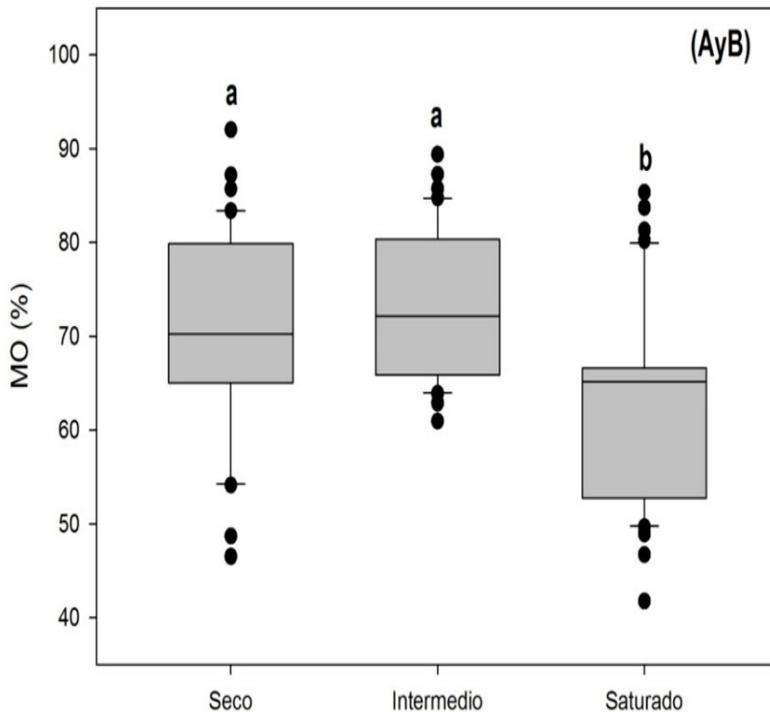


Figura 3. Diagrama de cajas con la concentración de la materia orgánica [%] por nivel de inundación. [Borde superior percentil 75%, mediana, borde inferior percentil 25%. La línea horizontal representa la mediana. Las letras representan diferencias significativas por análisis post-hoc de Mann-Whitney $p = 0.001$ y <0.001 , seco con saturado e intermedio con saturado, respectivamente].

Para el gradiente A, la media de la concentración de la materia orgánica [%] para los niveles de agua seco, intermedio y saturado corresponde a 64.6, 69.7 y 58.6; para el gradiente B, 77.5, 77.9 y 67.1. La mediana equivale a: gradiente A es 68.4, 68,7 y 52.7; gradiente B, 79.5, 79.2 y 65.7 respectivamente.

Los valores de materia orgánica, según el análisis individual de los gradientes, presentan también diferencia entre los niveles de inundación ($p = 0.009$ y <0.001 , gradiente A y B respectivamente, según la prueba Kruskal-Wallis). El análisis post-hoc con la prueba de Mann-Whitney indica que el nivel saturado de ambos gradientes, es el que presenta diferencias con los demás niveles [figura 4].

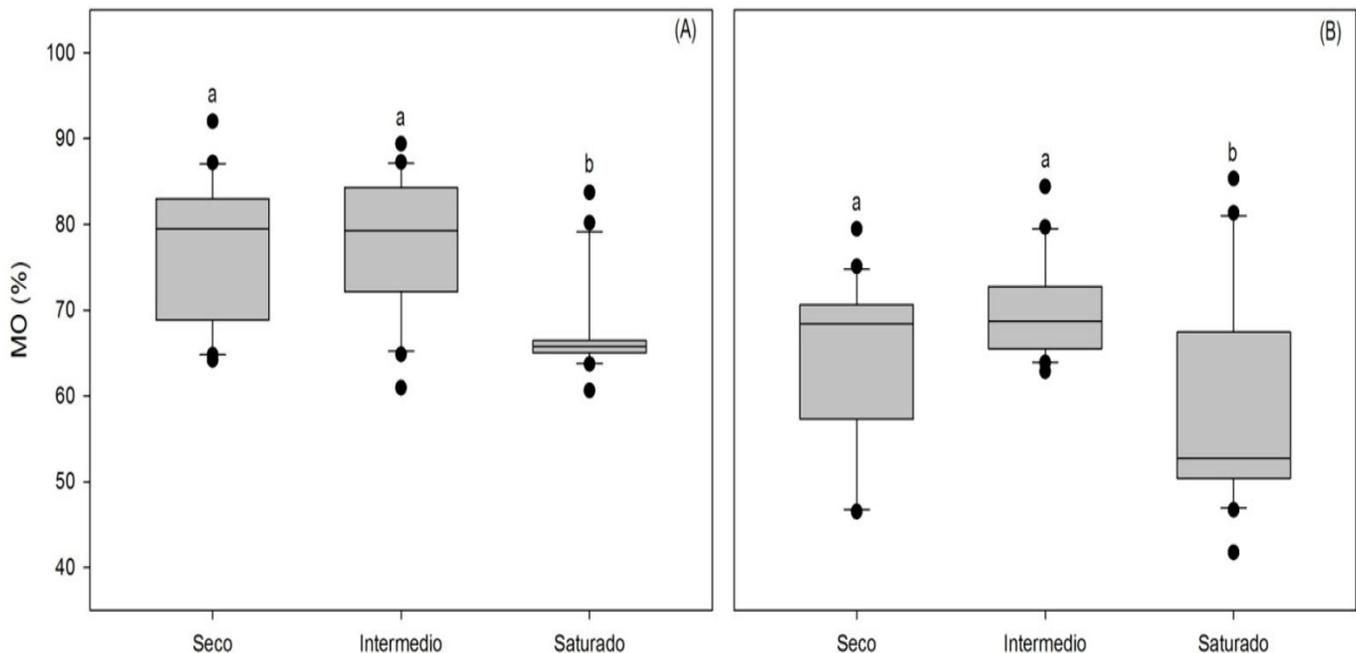


Figura 4. Diagrama de cajas con la concentración de la materia orgánica [%] por nivel de inundación, en el gradiente A y B. [Borde superior percentil 75%, mediana, borde inferior percentil 25%. Las letras representan diferencias significativas por análisis post-hoc de Mann-Whitney, gradiente A: $p = 0.006$ y 0.002 , seco con saturado e intermedio con saturado; gradiente B: $p = <0.001$ y <0.001 seco con saturado e intermedio con saturado respectivamente].

DISCUSIÓN

Concentración de materia orgánica

El nivel del agua desempeña un papel dominante en la determinación de la densidad aparente. Suelos húmedos, pero con niveles del agua no saturados (es decir, por debajo de la superficie del suelo), son las condiciones perfectas para que haya una mayor concentración de materia orgánica, a causa de la lenta degradación y además permiten la agregación de partículas (Hossain, Chen, & Zhang, 2015).

Los resultados de este estudio, presentaron similitud en la concentración de la materia orgánica entre los puntos secos e intermedios e indican menor concentración en los puntos saturados. Estos resultados contradicen la hipótesis inicial y a diferencia de otros resultados como los presentados por Villa & Mitsch (2014a) en un estudio realizado en el suroeste de Florida, donde se obtuvieron menor densidad aparente, en los dos puntos con mayor nivel de inundación, con un promedio entre los 0.3 y 0.1 g/cm³, muestreados a una profundidad de 32 y 48 cm.

La importancia relativa en los sitios de otros procesos simultáneos en los cuales la materia orgánica se transforma o se transporta, pueden explicar la diferencia encontrada entre los sitios con niveles secos o intermedios y los sitios saturados. El nivel saturado mostraba una alta dilución de la materia orgánica. La materia orgánica se subdivide en materia orgánica particulada (MODP) y en materia orgánica disuelta (MOD). La transformación de la materia orgánica, como materia orgánica disuelta, se da ya sea por procesos externos como material de escorrentía o por procesos endógenos derivados particularmente del alto nivel del agua. La biodegradabilidad de la MOD está fuertemente afectada por su complejidad estructural y se evidencia en el bajo contenido de carbono orgánico total (Alvarez, 2005; Suhett, Amado, Enrich-Prast,

Esteves, & Farjalla, 2007; Torres, Zúñiga & Peña, 2013a; Wang, Holden, Zhang, Li & Li, 2014).

En cuanto a la comparación de la concentración de materia orgánica con otros estudios en humedales de páramos andinos, se encontró la investigación realizada por Salvador, Moneris, & Rochefort, (2014) en la que determinaron la concentración de materia orgánica (%), en tres diferentes humedales situados en la puna peruana. El muestreo lo realizaron en el primer humedal a una profundidad de 25 cm, en el segundo humedal hasta los 45 cm y en el tercer humedal hasta los 50 cm de profundidad, la concentración promedio de materia orgánica que obtuvieron respectivamente en cada humedal corresponde a 67, 56 y 21%, lo que permite demostrar que en el presente estudio se obtuvo en general una alta concentración de materia orgánica.

Implicaciones para el manejo

Los humedales funcionan principalmente como depósitos a largo plazo para el dióxido de carbono atmosférico (CO₂) y como fuente de metano atmosférico (CH₄) (Bass et al., 2014; Davidson & Janssens, 2006; Sandoval et al., 2009). Entre los principales factores en la acumulación de CO₂ en los humedales, está la concentración de materia orgánica a través de la síntesis de biomasa vegetal (Blodau, Basiliko & Moore, 2004; Limpens et al., 2008; Peña Salamanca, 2013b).

Por lo tanto las implicaciones que acarrea un desequilibrio en la dinámica natural de estos ecosistemas, ya sea por perturbaciones humanas o naturales, inducen a un evidente cambio en la concentración de CO₂ en la atmósfera (Huo et al., 2013). Registros atmosféricos han demostrado que se ha aumentado la concentración de CH₄ desde el fin de la última glaciación (Blodau et al., 2004). Cerca del 25% del CH₄ emitido a la atmósfera proceden de humedales del trópico y zonas subtropicales. El incremento de estas emisiones se ha atribuido a variaciones en

el nivel freático [Villa & Mitsch, 2014b] y a la acelerada degradación de la materia orgánica en humedales, debido al aumento en la temperatura. En consecuencia podría ser la principal causa del calentamiento global observado en los últimos cien años [Zuñiga Escobar, 2013].

Derivado de lo anterior, crece la preocupación por las aceleradas emisiones de CH_4 y el aumento en las concentraciones de CO_2 atmosférico [Post & Mann, 1990], se ha empezado a evaluar la importancia que tienen los humedales como sumideros de CO_2 (es decir, eliminación neta de CO_2 atmosférico) [Peña Salamanca, 2013a].

CONCLUSIONES

En los humedales, se presenta una alta acumulación de materia orgánica debido a la constante deposición de biomasa, a la humedad del suelo y el escaso drenaje del agua, contribuyendo a condiciones anaeróbicas y por lo tanto bajas tasas de degradación [Glacer, 1987; Peña, Torres & Zuñiga, 2013b]. El nivel del agua y la cantidad de material vegetal juegan un papel importante en la densidad aparente y en la concentración de materia orgánica. En los puntos de muestreo donde se observó mayor concentración de material vegetal y un nivel del agua medianamente saturado, se presentó una baja densidad aparente y por lo tanto una mayor concentración de materia orgánica. Es de resaltar que los datos obtenidos en este estudio muestran altas concentraciones de materia orgánica en el humedal. No obstante la hipótesis planteada originalmente no se cumplió, ya que en el nivel freático saturado, se presentó el índice menor en cuanto a concentración de materia orgánica. La descomposición del material vegetal en estas condiciones es más lenta y por lo tanto da como resultado la solubilización de la materia orgánica (MOD).

Es importante continuar con futuros estudios que evalúen en los humedales no solo la variación en la concentración de la materia orgánica por nivel de inundación, si no también, la dinámica de la concentración de la materia orgánica al interactuar con factores como la temperatura y la vegetación (por especie y dominancia) y además las tasas de acumulación en diferentes tipos de humedales. Todo esto con el fin de generar más información que permita cuantificar la cantidad de carbono que se está almacenando en estos ecosistemas y que pueda servir como información base para investigaciones próximas dedicadas a comprender la relación existente entre los humedales y el cambio climático global; puesto que se considera que los humedales son de gran importancia por su capacidad de retención de carbono en el suelo, al actuar como amortiguadores del efecto de calentamiento global [Peña, Torres & Zuñiga, 2013a]

AGRADECIMIENTOS

A la docente Gloria María Mejía Zapata por su colaboración prestada y de igual forma a las estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental Sharon Andrea Acosta y Ana María Osorno y al centro de laboratorios de la Corporación Universitaria Lasallista por facilitar los equipos necesarios para la ejecución de esta investigación. Al guardabosque del páramo Santa Inés, Héctor Rojas Lozano. Este proyecto fue financiado con recursos del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS [Proyecto código: 127565944348, SGIP: FP44842-536-2014, Convocatoria: 659-2014].

■ REFERENCIAS

- Abella, S. R., & Zimmer, B. W. (2007). Estimating organic carbon from Loss-On-Ignition in Northern Arizona forest soils. *Forest, Range & Wildland Soils*, 71(2), 545–550. <http://doi.org/10.2136/sssaj2006.0136>
- Alvarez, S. (2005). La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Ecosistemas*, 14(2), 17–29.
- Bass, A. M., O'Grady, D., Leblanc, M., Tweed, S., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2014). Carbon Dioxide and Methane Emissions from a Wet-Dry Tropical Floodplain in Northern Australia. *Wetlands*, 34(3), 619–627. <http://doi.org/10.1007/s13157-014-0522-5>
- Benavides Duque, J. C. (2013). Perturbaciones en las turberas de páramo: la acción del hombre y el clima. In *Visión ecosistémica de los páramos de alta montaña colombiana: Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. (pp. 80–87). Instituto de Investigación De Recursos Biológicos Alexander VonHumboldt.
- Blodau, C., Basiliko, N., & Moore, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67, 33–351. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.625.5843&rep=rep1&type=pdf>
- Buytaert, W., Cuesta Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 19–33. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Cárdenas, T., & Cleef, A. M. (1996). El páramo: Un ecosistema de alta montaña. Retrieved from <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/faunayflora/paramo/indice.htm>
- Cleef, A. M. (2013). Origen, evolución, estructura y diversidad biológica de la alta montaña colombiana. In *Visión ecosistémica de los páramos de alta montaña colombiana: Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. (pp. 3–21). Instituto de Investigación De Recursos Biológicos Alexander VonHumboldt.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440, 165–173. Retrieved from <http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html>
- Frolking, S., & Roulet, N. T. (2007). Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Global Change Biology*, 13(5), 1079–1088. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Glacer, P. H. (1987). The ecology of patterned boreal peatlands of northern Minnesota: a community profile. *Biological Report*, 85 (7.14), 11–17.
- Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101–110. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1008119611481#page-1>
- Hossain, M. F., Chen, W., & Zhang, Y. (2015). Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information Processing in Agriculture*, 2(3-4), 183–190. <http://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.09.001>
- Hribljan, J. A., Cooper, D. J., Sueltenfuss, J., Wolf, E. C., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R.

- A. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15, 1–14.
- Huo, L., Chen, Z., Zou, Y., Lu, X., Guo, J., & Tang, X. (2013). Effect of Zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon. *Ecological Engineering*, 51, 287–295. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.020>
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J. G., Freeman, C., Holden, J., ... Rydin, H. (2008). Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences*, 5, 1475–1491.
- Murdiyarsa, D., Donato, D., Kauffman, J. B., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2009). *Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems* (No. 48). Indonesia.
- Peña Salamanca, E. J. (2013a). Aplicaciones para la estimación del balance de carbono en ecosistemas de alta montaña. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña del Neotrópico* (pp. 89–121).
- Peña Salamanca, E. J. (2013b). Monitoreo del ciclo del carbono en humedales. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña del Neotrópico* (pp. 77–86).
- Peña Salamanca, E. J., Torres González, A. Marina & Zuñiga Escobar, O. (2013a). Estudio de caso. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña del Neotrópico* (pp. 125–173).
- Peña Salamanca, E. J., Torres González, A. Marina & Zuñiga Escobar, O. (2013b). Importancia de ciclo del carbono en los ecosistemas de alta montaña. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña del Neotrópico* (pp. 13–34).
- Post, W. M., & Mann, L. K. (1990). Changes in soil organic carbon y nitrogen as a result of cultivation. In *Soils and the Greenhouse Effect* (pp. 401–406).
- Salehi, M. H., Beni, O. H., Harchegani, H. B., & Borujeni, I. E. (2011). Refining soil organic matter determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*, 21(4), 473–482. [http://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60149-5](http://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5)
- Salvador, F., Monerri, J., & Rochefort, L. (2014). Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15.
- Sandoval, H., Zuñiga, O., Torres, M., & Peña Salamanca, E. J. (2009). Estimates of Carbon Reservoirs in High-Altitude Wetlands in the Colombian Andes. *Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 110(2), 115–126.
- Suhett, A. L., Amado, A. M., Enrich-Prast, A., Esteves, F. de A., & Farjalla, V. F. (2007). Seasonal changes of dissolved organic carbon photo-oxidation rates in a tropical humic lagoon: the role of rainfall as a major regulator. *NRC Research Press*, 64, 1266–1272. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Albert_Suhett/publication/233490753_Seasonal_changes_of_dissolved_organic_carbon_photo-oxidation_rates_in_a_tropical_humic_lagoon_the_role_of_rainfall_as_a_major_regulator/links/5429b1f60cf29bbc12676941.pdf
- Villa, J. A., & Mitsch, W. J. (2014a). Carbon sequestration in different wetland plant communities in the Big Cypress Swamp region of southwest Florida. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 37–41. <http://doi.org/10.1080/0/21513732.2014.973909>

- Villa, J. A., & Mitsch, W. J. (2014b). Methane emissions from five wetland plant communities with different hydroperiods in the Big Cypress Swamp region of Florida Everglades. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 14(4), 253–266. <http://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.07.005>
- Vuille, M., & Urrutia, R. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Geophysical Research*, 114, 1–15. <http://doi.org/10.1029/2008JD011021>
- Wang, H., Holden, J., Zhang, Z., Li, M., & Li, X. (2014). Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimental warming. *Science of the Total Environment*, 470-471, 907–916. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.049>
- Wang, J., Wang, X., & Zhang, J. (2013). Evaluating Loss-on-Ignition Method for Determinations of Soil Organic and Inorganic Carbon in Arid Soils of Northwestern China. *Pedosphere*, 23(5), 593–599. [http://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60052-1](http://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60052-1)
- Zuñiga Escobar, O. (2013). Monitoreo del ciclo del carbono en suelos. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña del Neotrópico* (pp. 49–75).