

Variación de la densidad aparente y la concentración de carbono en el suelo a lo largo de un gradiente de niveles de agua en un humedal de alta montaña

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Ambiental

Juliana Marcela Marulanda Arango

**Asesor
Jorge Andrés Villa Betancur, Ph.D.
Ingeniero Ambiental**

**Corporación Universitaria Lasallista
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Caldas - Antioquía
2016**

Contenido

Introducción.....	6
Justificación.....	8
Objetivos	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos	10
Metodología.....	11
Sitio de estudio	11
Métodos en campo	11
Análisis de laboratorio	12
Análisis de datos	14
Resultados.....	15
Densidad aparente.....	15
Concentración de carbono.....	16
Discusión	19
Concentración de carbono.....	19
Implicaciones para el manejo	21
Conclusiones	23
Referencias.....	24

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica del municipio de Belmira.....	11
Figura 2: Densidad aparente en cada punto de muestreo del gradiente A y del gradiente B.....	15
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).....	16
Figura 4: Diagrama de cajas con la concentración de la materia orgánica (%) por nivel de inundación, en el gradiente A y en el gradiente 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).....	18

Lista de tablas

Tabla 1: Síntesis de valores de concentración de carbono orgánico (CO), determinados en algunos humedales de diferentes latitudes.	21
---	----

Resumen

Los humedales tienen gran importancia ecológica, uno de sus principales servicios ambientales consiste en la captura y almacenamiento de carbono en su suelo. 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. El objetivo de este trabajo investigativo se centro en determinar la densidad aparente y la concentración de carbono en el suelo de un humedal, en dos gradientes A y B, en cada uno se muestreo, en tres puntos diferentes, los cuales representaban una variación en el nivel del agua. Los resultados demuestran concentraciones significativas de carbono en los dos gradientes muestreados en el humedal, siendo el punto denominado en ambos gradientes como intermedio, donde se obtuvo una mayor concentración de carbono en (gC/kg) equivalente a 4040.3 y 4520.1 para el gradiente A y el B. Se evidencio que el nivel del agua y la cantidad de material vegetal juegan un papel importante en la densidad aparente y la concentración de materia orgánica.

Palabras claves: Humedal, gradiente, densidad, carbono, calentamiento 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 y la regulación del clima, a través del almacenamiento de carbono en los suelos (Frolking & Roulet, 2007). La degradación de los páramos debido al cambio climático, y la intensificación de la agricultura y la ganadería en los últimos 50 años, ha generado la pérdida progresiva de estos servicios ecosistémicos (Rojas P, 2011).

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, Zuñiga, 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).

Justificación

Pese a la importante función que cumplen los humedales como sumideros de carbono, las cantidades almacenadas 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 (Murdiyarso 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 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 parece que 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 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 carbono 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 anoxicas y la consecuente disminución de la descomposición.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la variación de la densidad aparente y la concentración de carbono en el suelo a lo largo de un gradiente de niveles del agua en un humedal de alta montaña del páramo de Belmira.

Objetivos específicos

Determinar la densidad aparente del suelo a lo largo de un gradiente de niveles del agua.

Determinar la concentración de carbono en el suelo a lo largo de un gradiente de niveles del agua.

Metodología

Sitio de estudio

El sitio de estudio corresponde a un humedal no perturbado de alta montaña ubicado en el páramo de Santa Inés, municipio de Belmira norte del departamento de Antioquia. 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 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 las densidades aparentes y de la concentración de carbono 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, representando condiciones más secas,

intermedias y saturadas. Estas condiciones correspondían a niveles del agua de 15 y 6 cm por debajo de la superficie del suelo respectivamente para las condiciones secas e intermedias, y de 40 cm por encima de la superficie del suelo para la condición de saturación.

La extracción de las muestras se hizo según el método utilizado 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, evitando 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 mientras se iban seccionando 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 procesadas y analizadas.

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 registro el peso seco y se calculo la densidad aparente teniendo en cuenta su volumen, según el diámetro del muestreador y la altura del incremento (i.e. 6.5 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 milímetros (mm). En este proceso se retiraron las raíces presentes. Finalmente se estimó el contenido de materia orgánica utilizando el método de pérdida por ignición LOI (“Loss On Ignition” por sus siglas en inglés), 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 el 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.

$$\% LOI_{550} = \frac{DW_{55} - DW_{550}}{DW_{55}} * 100 \quad \text{Ecuación 1,}$$

donde:

% LOI₅₅₀ 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 constante, sometiendo la muestra a 55°C, (g) y DW_{550} es el peso seco del suelo

después de la combustión a 550°C, (g). El contenido de carbono se determinó posteriormente dividiendo el %LOI por un factor de correlación igual a 1.724, donde se asume que la materia orgánica contiene 58% de carbono orgánico (United States Department Of Agriculture, 2014).

Análisis de datos

Para comparar las concentraciones de carbono 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 sólo los puntos de muestreo seco e intermedio del gradiente B tenían concentraciones de carbono que se distribuían normal se continuaron los análisis con pruebas no paramétricas.

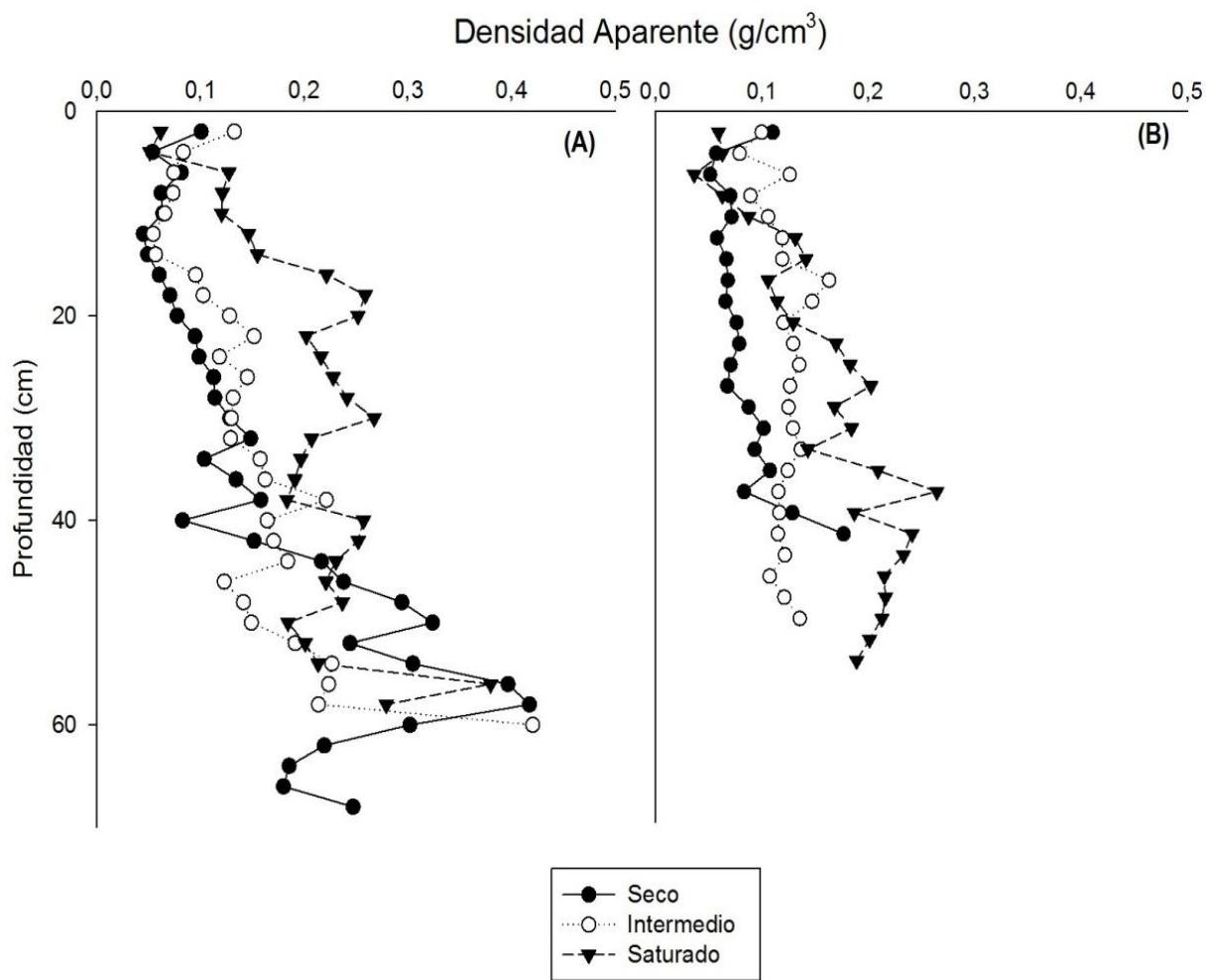
Para la comparación se utilizó primero la prueba Kruskal-Wallis para encontrar diferencias y la prueba U de Mann Whitney para identificar cuáles de los sitios presentaban diferencia. Ambas pruebas se hicieron con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$).

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. Los puntos de muestreo con menor densidad aparente fueron el seco y el intermedio en ambos gradientes.

Figura 2: Densidad aparente en cada punto de muestreo del gradiente A y del gradiente B.

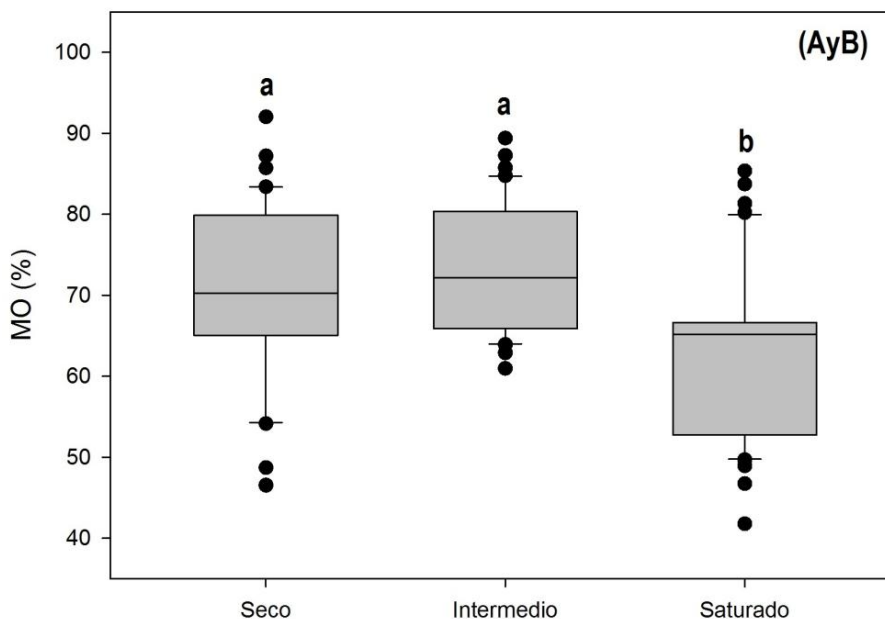


Concentración de carbono

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 (Figura 3). Las siguientes concentraciones corresponden a concentraciones de carbono (gC/kg) de 4120.7, 4280.2 y 3645.6 para el nivel seco, intermedio y saturado, 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).

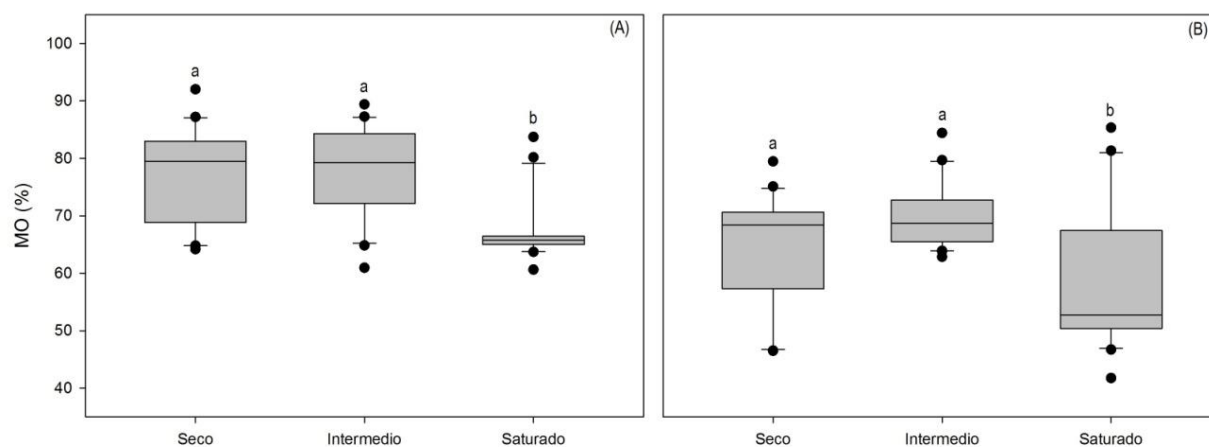
Figura 3: Diagrama de cajas con la concentración de la materia orgánica (%) por nivel de inundación. (Borde superior percentil 75%, mediana, borde inferior percentil 25%. La línea horizontal representa la mediana. Las letras representan diferencias significativas por análisis post-hoc de Mann-Whitney $p = 0.001$ 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 secos, intermedios y saturados 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 (Figura 4). Las concentraciones de carbono (gC/kg) por gradiente son: en el gradiente A de 3746.7, 4040.3 y 3398.1, y para el gradiente B de 4494.7, 4520.1 y 3893.2 para el nivel seco, intermedio y saturado respectivamente.

En este caso, los valores de materia orgánica, analizando los gradientes individualmente, 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 en el gradiente 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 carbono

En los humedales, la alta concentración de materia orgánica se debe a la constante depositación de biomasa, a la humedad del suelo y el escaso drenado del agua, contribuyendo a condiciones anaeróbicas y por lo tanto bajas tasas de degradación, ocasionando una mayor acumulación de materia orgánica (Glacer, 1987; Torres González, Zuñiga Escobar, & Peña Salamanca, 2013b).

El nivel del agua desempeña un papel dominante en la determinación de la densidad aparente. Suelos húmedos, pero con niveles del agua no saturados (i.e. 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).

Soportando lo anterior, los resultados de este estudio, presentaron similitud en la concentración de la materia orgánica, determinada a partir de la densidad aparente y el método LOI. Por medio de la densidad se obtuvo mayor concentración de materia orgánica en el punto seco, seguido del intermedio, con una diferencia mínima. Las pruebas estadísticas realizadas a los datos obtenidos por medio del LOI, demuestran que no hay una diferencia estadística en cuanto a la concentración de materia orgánica obtenida en los puntos de muestreo, seco e intermedio, de los dos gradientes.

Estos resultados, comparados con otro estudio, indican una diferencia acerca de la concentración de materia orgánica y el nivel del agua del punto donde fue colectada la muestra de suelo, ya que en la investigación realizada en el suroeste de Florida,

obtuvieron mayor densidad aparente, en los dos puntos con mayor nivel de inundación, se muestreo a una profundidad hasta 32 y 48 cm (Villa & Mitsch, 2014a).

Otra investigación, llevada a cabo en la Reserva Natural Nacional de Humedales Zoige, en la provincia de Sichuan en China, quienes cuantificaron el carbono orgánico en 3 puntos definidos en el humedal a una profundidad de 50 cm, reportaron mayor concentración de carbono en el punto de muestreo denominado pradera, que en el pantano y un valor inferior en prado pantanoso (Huo et al., 2013).

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 afecta 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 González, Zuñiga Escobar, & Peña Salamanca, 2013a; H. Wang, Holden, Zhang, Li, & Li, 2014).

En términos generales, la concentración de carbono orgánico obtenido en esta investigación, es considerablemente alto, resultado que se esperaba, por su potencial

para almacenar carbono (Hernández, 2010). En la tabla 1, se relacionan algunos valores de concentración de carbono orgánico reportados por investigadores.

Tabla 1: Síntesis de valores de concentración de carbono orgánico (CO), determinados en algunos humedales de diferentes latitudes.

Tipo de humedal	Ubicación	Latitud	CO
Llanura de inundación (Floodplain)	Norte de Australia	-	Min 9.6 ± 1.5 mg/L Max 14 ± 1.4 mg/L
Turbera- sin perturbación	Sur Oeste de Florida	(26°N)	Min 59 (37-91) gC/Kg Max 438 (321-511) gC/Kg
Laguna	Norte de Río de Janeiro	(22°17'S)	Min 1.28 mmol/L Max 4.86 mmol/L
Turbera –con perturbación (Bajo pastoreo y Mayor pastoreo)	Noreste de la meseta Qinghai-Tíbet	(31°51'N a 34°19'N)	Bajo pastoreo Promedio 236.6 Tg Mayor pastoreo Promedio 239.5 Tg
Turbera	PNN Los Nevados	(4°48'N)	Promedio 1.5 Kg/m ²
Turbera	PNN Chingaza	(4°28'N)	Promedio 0.7 Kg/m ²

Fuente: Los datos de la tabla fueron tomados de: (Bass et al., 2014; Post & Mann, 1990; Suhett et al., 2007; Villa & Mitsch, 2014a)

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). De los principales factores en la acumulación de CO₂ en los humedales, es 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 atmosfera (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 atmosfera 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 CH₄ y el aumento en las concentraciones de CO₂ atmosférico (Post & Mann, 1990), se ha empezado a evaluar la importancia que tienen los humedales como sumideros de CO₂ (i.e. eliminación neta de CO₂ atmosférico) (Peña Salamanca, 2013a).

Conclusiones

El nivel del agua y la cantidad de material vegetal juegan un papel importante en la densidad aparente y la concentración de materia orgánica. En los puntos de muestreo donde había mayor concentración de material vegetal y un nivel del agua medianamente saturado, la concentración de materia orgánica fue mayor.

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 lento y por lo tanto da como resultado la solubilización de la materia orgánica (MOD). No obstante es de resaltar que los datos obtenidos en este estudio muestran altas concentraciones de materia orgánica en el humedal. Es importante continuar con futuros estudios donde se evalué en los humedales no solo la variación en la concentración de la materia orgánica por nivel inundación, si no también, como es 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 crear una base de datos que permita cuantificar la cantidad de carbono que se está almacenando en estos ecosistemas y que sirva de base para investigaciones próximas dedicadas a comprender la relación existente entre los humedales y el cambio climático global, dado que se considera que los humedales son de gran importancia por su capacidad de retención de carbono en el suelo, sirviendo como amortiguadores del efecto del calentamiento global (Torres González et al., 2013a) .

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>

- Hernández, M. E. (2010). Wetland Soils as Carbon Sinks and Sources of Methane. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139–147.
- 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.
- Murdiyarso, 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 estimacion 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).

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).

Rojas P, J. (2011). El pago por servicios ambientales como alternativa para el uso sostenible de los servicios ecosistémicos de los páramos. *Ambiente Y Sostenibilidad*, (1), 57–65.

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)

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

Torres González, A. marina, Zuñiga Escobar, O., & Peña Salamanca, E. J. (2013a). Estudio de caso. In *Monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta*

montaña del Neotrópico (pp. 125–173).

- Torres González, A. marina, Zuñiga Escobar, O., & Peña Salamanca, E. J. (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).
- United States Department Of Agriculture. (2014). Soil Survey Laboratory Methods Manual. In *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual* (3rd ed., p. 709).
- 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/10.1080/21513732.2014.973909>
- 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).