

# CARACTERIZACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE CARBONO EN PEQUEÑOS HUMEDALES ANDINOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO BARBAS (QUINDÍO, COLOMBIA)

## Characterization of carbon storage in small Andean Wetlands of the upper Río Barbas Watershed (Quindío, Colombia)

MARÍA CECILIA ROA-GARCÍA

*Fundación Evaristo García. Parcelación Colinas de Arroyohondo, casa 11. Km. 1 vía a Dapa, Cali, Colombia. Autor para correspondencia: croa09@gmail.com*

*Faculty of Land & Food Systems. University of British Columbia. Rm 156C MacMillan Building. 2357 Main Mall, Vancouver, V6T 1Z4 Canadá.*

SANDRA BROWN

*Faculty of Land & Food Systems. University of British Columbia. Rm 156C MacMillan Building. 2357 Main Mall, Vancouver, V6T 1Z4 Canadá. sandra.brown@ubc.ca*

### RESUMEN

Se caracterizó el proceso de acumulación de carbono en pequeños humedales andinos de la cuenca alta del río Barbas, en el municipio de Filandia, departamento del Quindío, Colombia. El método de bolsas de descomposición se usó para estimar las tasas de acumulación de materia orgánica y las constantes de descomposición en el corto plazo. La pérdida por ignición y la datación con carbono 14 se usaron para calcular las tasas de acumulación de carbono en el largo plazo. Los 52 humedales ocupan un área de 7,2 ha y se encuentran entre 2000 y 2200 m. La constante de descomposición,  $k$  es de 0,524 para los suelos de humedal en contraste con 0,962 para los suelos de tierra firme. La concentración de carbono en los tres humedales muestreados varía entre 91 y los 319 gr C Kg<sup>-1</sup>. Las reservas de carbono por unidad de área en los tres humedales muestreados varía entre 80 y 117 Kg C m<sup>-2</sup>. La tasa de acumulación de carbono en el largo plazo - LARCA - es de 30 - 50 gr C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, tasa comparable con la encontrada en turberas de páramos andinos.

**Palabras clave.** Captura de carbono, LARCA, humedales andinos, río Barbas.

### ABSTRACT

This paper presents a characterization of the carbon accumulation process in small Andean wetlands located in the Upper Rio Barbas, in the town of Finlandia, Quindio, Colombia. Decomposition bags were used to estimate organic matter decomposition rates and values for the decomposition constant in the short term; loss on ignition and carbon-14 dating were used to calculate rates of carbon accumulation in the long term. The 52 wetlands occupy an area of 7.2 ha and are located at elevations between 2,000 and 2,200 masl. The decomposition constant,  $k$  is 0.524 for wetland soils in contrast with 0.962 for well drained soils. The carbon concentration in the three wetlands varies between 91 and 319 g C kg<sup>-1</sup>. Carbon stocks per unit area in the three studied wetlands range between 80 and 117 kg C m<sup>-2</sup>. The long term rate of carbon accumulation - LARCA - is between 30 and 50 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>, comparable to those found for peat areas of Andean *paramos*.

**Key words.** Carbon storage, LARCA, Andean wetlands, Barbas River.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales constituyen el 6% del área terrestre global (Mitsch & Gosselink 2013), pero son uno de los ecosistemas más productivos del planeta y juegan un papel fundamental en el ciclo de carbono (Pant *et al.* 2003) por sus bajas tasas de descomposición de materia orgánica relacionadas con condiciones de saturación de agua que crean ambientes anaeróbicos. Algunos humedales como las turberas (peatlands) cubren 3% de la superficie terrestre (Chimner & Karberg 2008) y almacenan entre 12% y 30% del carbono total depositado en los suelos (Clymo *et al.* 1998), que se estima en 2500 Pg ( $10^{15}$  gramos) (Lal 2008). Se estima que las turberas tropicales guardan entre el 19% y el 25% del carbono almacenado en turberas, con una alta concentración en el Sureste asiático (con el 77% del carbono en turberas tropicales) seguido por Sur América con el 11% (Page *et al.* 2011).

A pesar de su importancia, muchos humedales permanecen desprotegidos y son explotados como fuentes de suelo, agua y biomasa y su degradación y pérdida es más rápida que la de cualquier otro ecosistema (Marchant & Hooghiemstra 2004). El área global de humedales declinó drásticamente entre 1993 y 2007 especialmente en las zonas tropicales de Sur América y el Sureste asiático (Pringent *et al.* 2012). La mayoría de los estudios acerca de la captura de carbono en los suelos se han enfocado en bosques y cultivos, a pesar de la importancia de los suelos de humedales. Globalmente los humedales pequeños son considerados importantes a escalas locales para la regulación hídrica, la conservación de biodiversidad y la calidad del agua. En años recientes se han realizado varios estudios en humedales tropicales que buscan estimar la concentración de carbono con relación a la profundidad del suelo ( $\text{gr C kg}^{-1}$  de suelo), los depósitos de carbono de una profundidad determinada por unidad de área ( $\text{kg C m}^{-2}$ )

y las tasas de captura de carbono ( $\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ).

En Colombia los humedales se concentran en el piedemonte de la Amazonia (Ricaurte *et al.* 2014), los páramos, y las zonas planas y bajas de los ríos Cauca y Magdalena (Restrepo & Naranjo 1987). Sin embargo, se encuentran numerosos humedales pequeños dispersos a elevaciones intermedias en la zona andina y colectivamente podrían ser una contribución importante a los depósitos regionales de carbono (Chimner & Karberg 2008).

Los humedales, los lagos, las lagunas y las lagunetas en Colombia, especialmente de las altas montañas han sido estudiados por su sensibilidad a las condiciones climáticas, convirtiendo sus suelos en registros de los cambios climáticos ocurridos en el Pleistoceno y Holoceno (Cardozo *et al.* 2014, Marchant *et al.* 2002, Kuhry 1988, Helmens & Kuhry 1986). Existe un importante análisis palinológico en diversas regiones del país que ha permitido establecer la sincronía del clima local con algunos cambios climáticos globales y también demostrar los incrementos recientes en temperatura asociados con actividades humanas. Por ejemplo ha podido establecerse que hubo una etapa húmeda desde 4.000 a 3.620 años BP (Velásquez 2005).

Los humedales tropicales ubicados en elevaciones intermedias (entre los 1.000 y los 3.000 m) no han sido suficientemente descritos en términos de sus procesos edáficos. Este artículo busca contribuir al conocimiento sobre estos humedales en el contexto de su alta vulnerabilidad frente al cambio climático, que está produciendo condiciones más secas y más calientes y ocasionando la pérdida de sumideros de carbono. Existen evidencias de que períodos prolongados de sequía pueden hacer pasar las turberas de sumideros a fuentes de carbono (Hirano *et al.* 2007) al igual que el pastoreo intensivo (Enríquez *et al.* 2015). El estudio sobre las turberas del norte de los

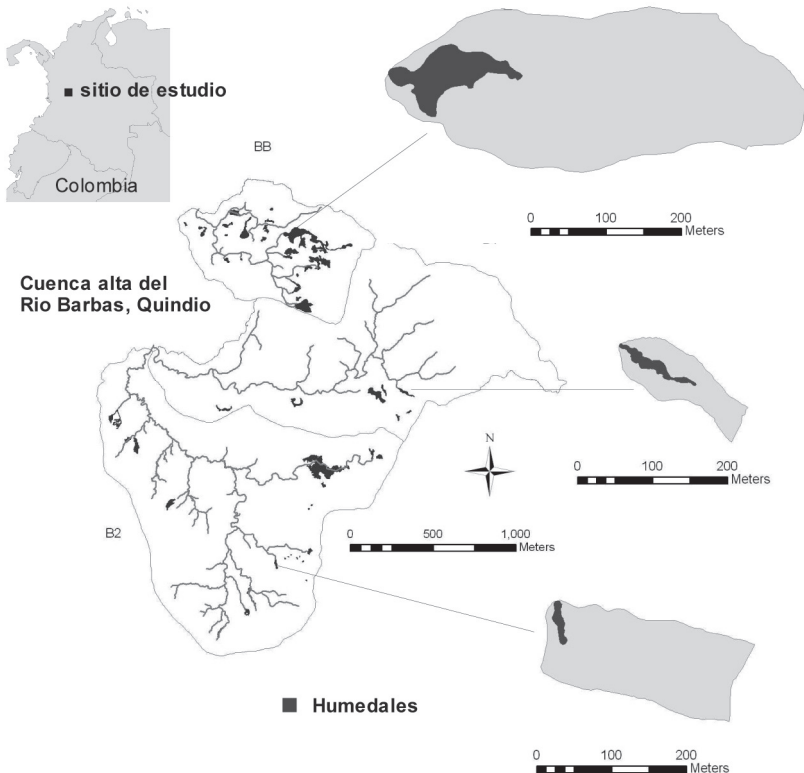
Andes (Benavides-Duque 2013) muestra una tendencia de las turberas a convertirse en humedales con vegetación adaptada a períodos de sequía, y a mayores niveles de nutrientes provenientes de actividades humanas, reduciendo la capacidad de estas zonas de acumular carbono y regular el ciclo del agua. Los humedales de elevación media pueden ser tan vulnerables como los humedales alto andinos por las mayores temperaturas medias y sus efectos directos en la hidrología de las cuencas.

### ÁREA DE ESTUDIO

Las micro-cuencas y los humedales de este estudio están ubicados en el municipio de Filandia, Quindío, Colombia (4,67° N; 75,63 ° W) entre los 2.000 y los 2.200 m (Figura 1). Gran parte del suelo en las dos micro-cuencas está dedicado a la ganadería extensiva para

leche, carne y el toreo. Los humedales del Quindío son descritos en algunos reportes de la Corporación Autónoma Regional del Quindío (2001), Jaramillo *et al.* (2001). De Wilde (1998) realizó un inventario preliminar de los humedales en el que se describe brevemente la zona de la cuenca alta del río Barbas.

La cuenca alta del río Barbas consta de cuatro micro-cuencas: el nacimiento del Barbas, la quebrada Sonora, la quebrada Barro Blanco y la quebrada Bolillos. Las últimas dos micro-cuencas tienen un área importante de pequeños humedales, lo cual junto con la alta precipitación ha conducido a que las micro-cuencas sean denominadas la estrella hídrica del Quindío (CRQ 2001). Los humedales ubicados en cabeceras de cuencas de los Andes están altamente impactados por la ganadería y la expansión de la agricultura. El reducido



**Figura 1.** Ubicación del sitio de estudio y de los humedales dentro de las micro-cuencas.

tamaño de los humedales del Quindío también contribuye a que sean sistemas altamente amenazados. Las micro-cuencas Barro Blanco y Bolillos tienen un área total de 400 ha y las dos quebradas constituyen la fuente de agua para la zona urbana y rural del municipio de Filandia, de aproximadamente 15.000 habitantes, y sus actividades económicas que incluyen la ganadería lechera, café, otros productos agrícolas y turismo (hoteles). Los humedales de Barro Blanco y Bolillos han sido estudiados en términos de su contribución a la hidrología de las micro-cuencas. Un estudio de hidrología isotópica permitió demostrar que estos humedales son componentes de las micro-cuencas donde el agua se almacena por períodos más largos que en otros compartimentos de la cuenca, prolongando el tiempo promedio de respuesta y reduciendo los rendimientos anuales (Roa-García & Weiler 2011). Las curvas de duración de caudal de las micro-cuencas permitieron inducir que la concentración de humedales retrasa la reducción de caudales al inicio del verano (Roa-García *et al.* 2011) pero no contribuye a aminorar los caudales en grandes aguaceros cuando su capacidad de almacenamiento se satura (Roa-García & Weiler 2011).

Algunos de los humedales han sido cercados por los acueductos comunitarios y el municipio para prevenir el pastoreo dentro de sus áreas ya que a los humedales se les atribuye una contribución al suministro de agua en el verano.

Las micro-cuencas se ubican en el abanico Quindío-Risaralda compuesto de sedimentos fluvio-volcánicos depositados durante el último millón de años sobre una base Cretácea volcánica y metamórfica. El abanico está compuesto por 12 unidades distintas que varían en su composición, dirección y cronología. La unidad en la que se encuentran los humedales corresponde a una de las más antiguas, que tiene una orientación este-oeste y una topografía ondulante (Guarín *et al.* 2004) que ha inducido

la formación de humedales. Los sedimentos son mayoritariamente arcillas de tamaño uniforme con fragmentos de cristales gruesos. La unidad también se caracteriza por la presencia de una capa de ceniza volcánica que en algunos sitios alcanza los 10 metros de espesor, la cual contribuye a reducir la tasa de infiltración de agua en el suelo. Los suelos formados en estos sedimentos se clasifican como Andisoles (Acrudoxic Hapludans) (IGAC 1996). Las principales características de estos suelos incluyen su baja densidad aparente, una alta capacidad de absorción y un alto contenido de materia orgánica (Salomons 1886). Después de los Histosoles, los Andisoles son los suelos con el más alto contenido de materia orgánica que en combinación con su alto contenido de alófonos e imogolitas (minerales de silicato amorfos o pobremente cristalizados), resulta en suelos ligeros de baja densidad aparente, con alta capacidad de retención de agua.

La precipitación media anual en la región registrada desde 1972 ha sido de aproximadamente 2.990 milímetros. La zona central de Colombia al igual que la cordillera Occidental de los Andes experimenta un ciclo de precipitación anual bi-modal tetraestacional, con picos de lluvias durante abril-mayo y octubre-noviembre, y períodos de baja precipitación durante diciembre-febrero y junio-agosto.

## MÉTODOS

**Inventario de humedales, batimetría, precipitación, nivel de agua y temperatura.** El inventario de los humedales se hizo usando una imagen del satélite Quick Bird con resolución de 0,6 metros tomada en 2003 en combinación con el uso de un GPS en el campo, como parte del mapeo de uso del suelo de las dos micro-cuencas. El mapeo en campo fue trasladado posteriormente a ArcGIS® para el análisis espacial. Tres humedales fueron seleccionados para el monitoreo de variables biofísicas como densidad aparente del suelo, contenido de materia orgánica y tasas de descomposición de

materia orgánica. La micro-cuenca Bolillos, debido a su tamaño se dividió en dos micro cuencas denominadas Bolillos 1 y Bolillos 2. Cada humedal tiene una batimetría particular que determina su volumen y sus características de almacenamiento de carbono y de agua. Para caracterizar el proceso de acumulación de materia orgánica, se escogió un humedal en cada una de las tres micro-cuencas (Figura 1). Para cada humedal seleccionado se tomaron mediciones de profundidad con una sonda rusa prolongada, siguiendo transeptos a distancias conocidas. Las profundidades de la capa de materia orgánica de los suelos de los humedales se introdujeron en ArcGIS<sup>®</sup> para generar archivos ASCII utilizados en el cálculo de los volúmenes de los humedales con IDL<sup>®</sup>.

La precipitación se midió usando pluviómetros con memoria marca HOBO<sup>®</sup> operando entre octubre 2004 y mayo 2007 para el estudio hidrológico de las micro-cuencas; como parte de este mismo estudio, el nivel del agua en los humedales fue determinado usando medidores de nivel marca Odyssey<sup>®</sup>. El nivel del agua se registró cada 15 minutos desde junio 2005 hasta mayo 2007. La temperatura del agua se registró usando termómetros digitales HOBO<sup>®</sup> con una precisión de 0,2 °C. Estos dispositivos se sumergieron a una profundidad de 20 cm en los humedales durante un año a partir de junio de 2005 hasta mayo de 2006.

**Tasas de descomposición.** La tasa de descomposición potencial de plantas fue estimada a través de la técnica de las bolsas de descomposición (Wieder and Lang 1982). Muestras de tres especies de hierbas fueron recolectadas en el campo y secadas en horno a 40 °C durante 48 horas. Bolsas de malla de nylon de 10 x 10 cm con tamaño de malla de 1 mm se llenaron con aproximadamente 10 gramos de material seco. Un total de 24 bolsas se llenaron para cada especie vegetal. Cada muestra se pesó por separado, se registró el peso inicial y la muestra fue marcada numéricamente. El tama-

ño de malla de 1 mm es suficientemente pequeño para evitar la pérdida de material, pero permite el acceso de los descomponedores. El diseño experimental fue de 12 repeticiones espaciales para medir la descomposición bajo el suelo en dos condiciones: humedales (medio saturado) y pastos (medio no saturado). Las bolsas con una etiqueta plástica fueron enterradas a 20 cm de profundidad. Dos bolsas de cada especie / familia: *Juncus effusus* L. (Juncaceae), *Axonopus compressus* (Sw.) P. Beauv. (Poaceae) y *Eleocharis maculosa* (Vahl) Roem. & Schult. (Cyperaceae) fueron sacadas del suelo cada 4 meses en cada uno de los 2 sitios (humedales y pastos). Las muestras se lavaron con cuidado para eliminar el exceso de suelo, se secaron en horno (40 °C durante 48 horas) y se pesaron para registrar el peso final. El peso final representa la masa que queda después de la descomposición calculada en forma porcentual con relación al peso inicial. El porcentaje de masa remanente para cada tipo de planta y sitio, fue calculado usando la ecuación (Chimner & Ewel 2005):

$$M_R = [(X_o - X) / X_o] * 100$$

donde  $X_o$  representa la masa seca inicial y  $X$  = masa seca después de la descomposición

La tasa de descomposición fue determinada por la pérdida de masa en el tiempo (2 años). Un modelo de descomposición exponencial de primer orden fue estimado para cada planta y cada sitio de la forma:

$$M_R = 100 * e^{-kt}$$

donde  $M_R$  = masa remanente en el tiempo  $t$  (en años) y  $k$  es la constante de descomposición (Wieder & Lang 1982, Clymo 1998).

**Muestreo de suelos y análisis de carbono.** Al mismo tiempo que se determinó la profundidad de cada humedal, se tomaron las muestras para el análisis de contenido de carbono de los suelos y en consecuencia el muestreo de suelos se hizo dependiendo de la profundidad de cada humedal. Para los humedales BB y

B1 se tomaron muestras para profundidades entre 0 y 0,20 m; entre 0,20 y 0,50 m; entre 0,50 m y 1,00 m; entre 1,00 y 2,00 m; y entre 2,00 y 3,50 m. Para el humedal B2 se tomaron muestras entre 0 y 0,50 m; 0,50 y 1,20 m; 1,20 y 2,00 m; y entre 2,00 y 3,00 m. La sonda rusa usada con un diámetro de 7 cm minimiza la compactación y distorsión de la muestra (Tan 2005).

En el laboratorio de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, molidas y pasadas por un tamiz de 2 mm. Luego fueron colocadas en crisoles de pesos conocidos, secadas a 105 °C y posteriormente quemadas a 550 °C, para determinar el contenido de carbono de suelo utilizando pérdida por ignición (Nelson & Sommers 1996). El número de muestras analizadas fue de 55 para el humedal más grande (BB con 6.650 m<sup>2</sup>), 22 para B1 (con 1.070 m<sup>2</sup>) y 19 para B2 (con 550 m<sup>2</sup>).

El contenido de materia orgánica fue calculado con la fórmula  $MO\% = (\text{peso constante a } 105\text{ }^\circ\text{C} - \text{peso constante a } 550\text{ }^\circ\text{C}) / \text{peso constante a } 105\text{ }^\circ\text{C}$ . El porcentaje de carbono orgánico fue calculado como una porción de la materia orgánica usando el factor de Van Bemmelen (0,58) (Marín-Muñiz *et al.* 2014).

La densidad aparente se obtuvo secando un volumen conocido de suelo (67,467 cm<sup>3</sup>) a 105 °C hasta alcanzar un peso constante.

El almacenamiento de carbono por unidad de área se calculó usando la ecuación:

$\text{Kg C m}^{-2} = [\text{peso seco del suelo}] * [\%CO]$   
donde, peso seco del suelo (Kg m<sup>-2</sup>) = [profundidad muestreada] \* [densidad aparente]  
 $\%CO = \text{contenido de carbono orgánico}$

El almacenamiento de carbono a las profundidades de 2, 3 o 3,5 m (dependiendo del hu-

medal) se calculó adicionando el carbono de cada uno de los segmentos de suelo analizados (Marín-Muñiz *et al.* 2014; Bernal & Mitsch 2013). Con base en los volúmenes de los humedales estimados a partir de la batimetría y el área total de humedales en las cuencas objeto de estudio, se hizo un estimado del carbono total almacenado en los pequeños humedales.

**Tasas de acumulación vertical.** Las tasas de descomposición de materia orgánica y de acumulación de carbono se calcularon con base en datos del humedal más grande de los tres escogidos. Para calcular la tasa de acumulación de carbono en los suelos de los humedales en el largo plazo se requiere conocer las tasas de acumulación del suelo por unidad de tiempo (cm año<sup>-1</sup>). Esto se hizo mediante la datación de muestras de suelo usando el método de AMS (Accelerator Mass Spectrometry) (Björk & Wohlfarth 2001) en el Laboratorio de Carbono Radiactivo de Poznan (Polonia). Esta datación se hizo como parte de un proyecto de maestría sobre palinología de la Universidad de Ginebra (Suiza) (Muñoz-Uribe 2007). El laboratorio ha procesado más de 70.000 muestras de <sup>14</sup>C e hizo parte de la V Inter-comparación Internacional de Laboratorios entre 2001 y 2009, con el fin de asegurar la calidad de sus procesos. Las muestras no fueron procesadas en Colombia antes de su envío al laboratorio.

La acumulación de suelo en el largo plazo se calcula con base en la cantidad de carbono encontrada en las capas de suelo con las respectivas dataciones de <sup>14</sup>C, y se estiman las tasas de acumulación de carbono por unidad de área y por año. Estos cálculos pueden hacerse por capa de suelo o por el total del perfil de suelo estudiado. Las tasas de acumulación del largo plazo para todo el perfil del suelo del humedal BB fueron calculadas como el carbono total dividido por la edad del suelo determinada mediante datación con <sup>14</sup>C (Chimner & Karberg 2008).



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los humedales se concentran en la microcuenca Barro Blanco con 3,8 hectáreas, es decir el 6,1% del área. Para Bolillos 1 y 2 las áreas de humedales son 0,8 y 2,6 hectáreas que corresponden a 0,5% y el 1,5% del área total respectivamente. El mayor humedal se encuentra en Bolillos 2 y tiene una superficie de 1,5 ha. De los 52 humedales en el inventario, sólo tres humedales tienen un área mayor a 0,6 ha.

La Figura 2 muestra como varía el nivel del agua en los humedales monitoreados, donde BB, con mayor extensión y ubicado en un terrero relativamente plano, presenta variaciones pequeñas en su nivel de agua, en comparación con los otros humedales ubicados en depresiones del terreno, que facilitan la acumulación de agua después de eventos de lluvia.

La temperatura observada en el agua de los humedales en relación con la temperatura del aire se muestra en la Figura 3. El humedal B1 presenta un contenido de agua en el suelo

relativamente bajo en comparación con los otros dos humedales (mayor densidad aparente del suelo), lo que explica que la temperatura del agua en ese humedal (Figura 3 inferior izquierda) sea muy similar a la temperatura del aire (Figura 3 superior izquierda). Mientras tanto la temperatura del agua en los otros dos humedales (Figuras 3 superior e inferior derecha) es un poco más baja a lo largo del año, aunque mantiene las altas variaciones en el verano especialmente en los meses de julio y agosto.

La edad del humedal BB, estimada en 5.150 años puede estar relacionada con el inicio de un período más húmedo y frío en los Andes colombianos del cual existen evidencias en la cordillera Occidental en el páramo de Frontino empezando hace 3.900 años (Velásquez & Hooghiemstra 2013), en la cordillera Oriental en la laguna de Fúquene empezando hace 11.900 años (Groot *et al.* 2011), en el Macizo Colombiano, laguna de La Cocha a partir de hace 4.850 años (González-Carranza *et al.* 2012) y en los Llanos Orientales a partir de hace 7.300 años (Hooghiemstra & Berrio 2007).

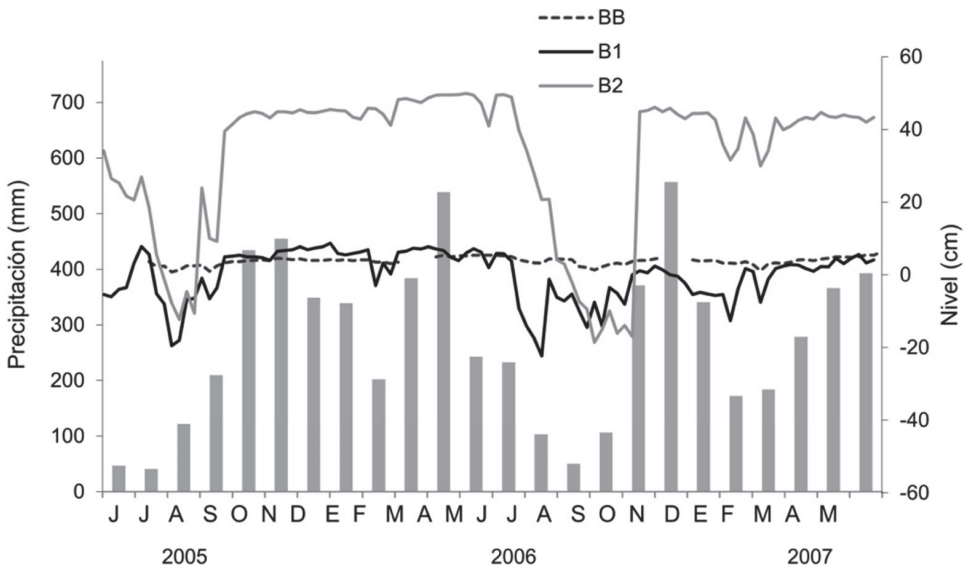
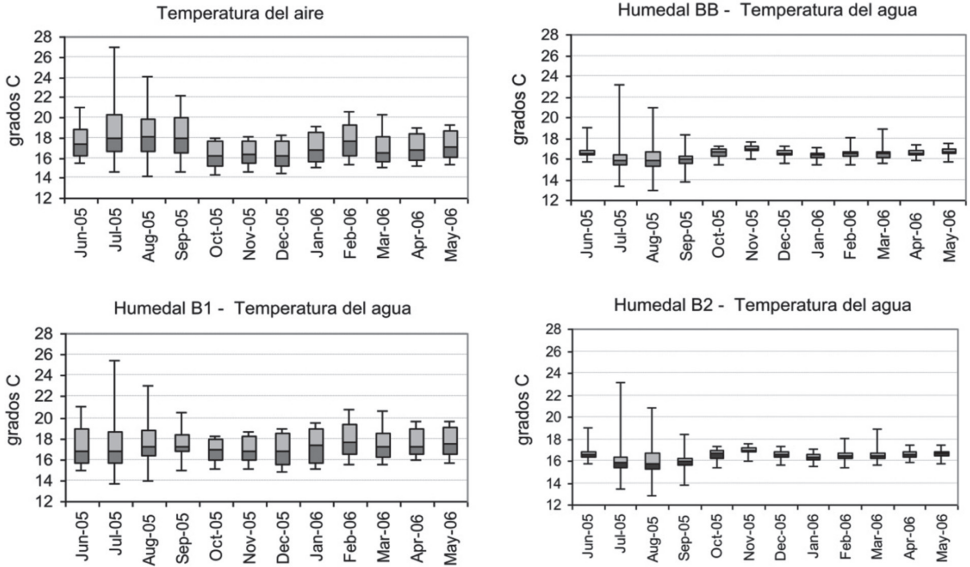


Figura 2. Precipitación mensual y fluctuación del nivel del agua en 3 humedales monitoreados.



**Figura 3.** Mediciones de temperatura mensual del aire y del agua en los humedales. Cuartil bajo, mediana, cuartil superior, temperatura mínima y máxima

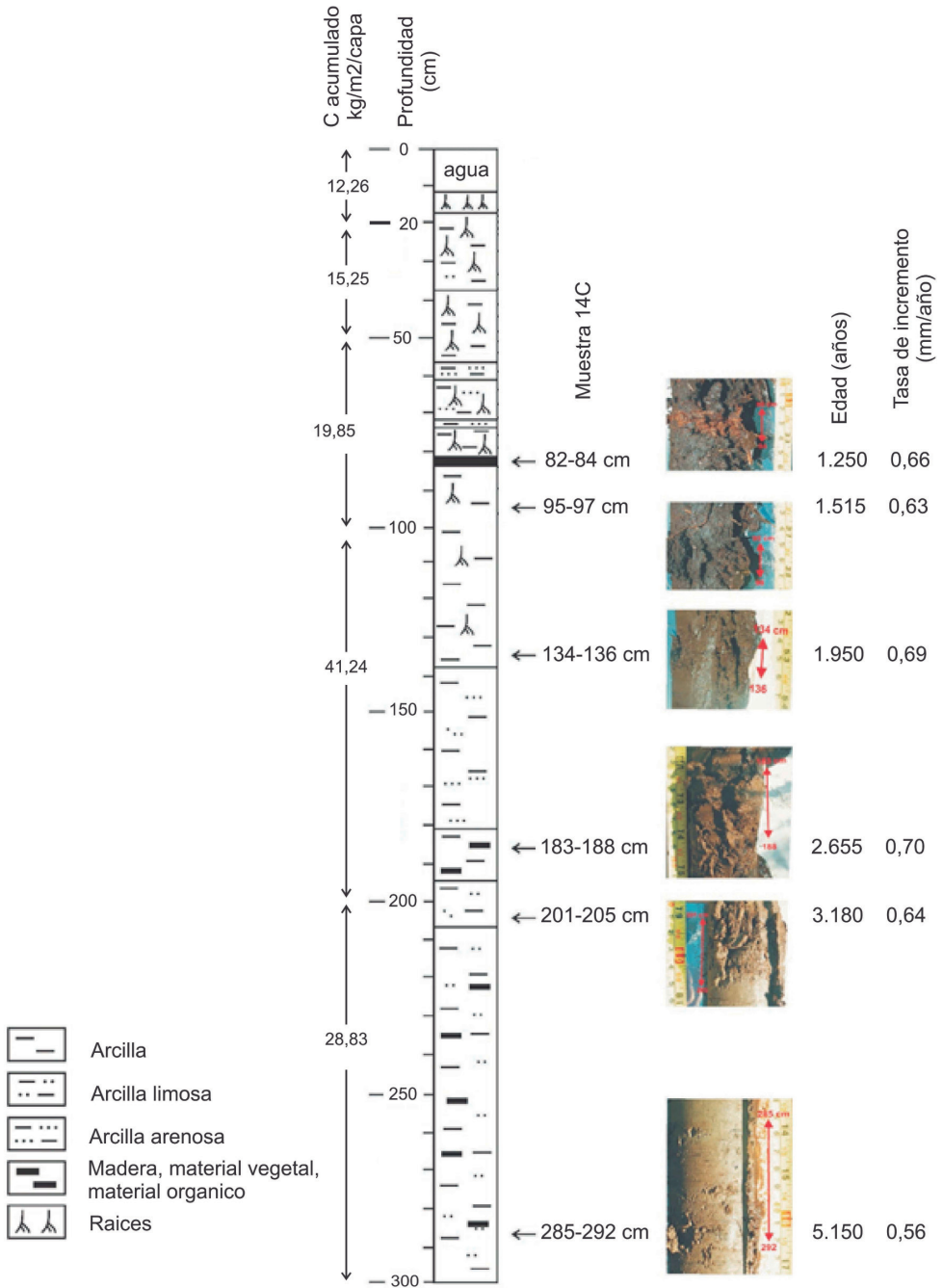
El estudio palinológico realizado para el humedal BB (Muñoz-Uribe 2007) permitió establecer coincidencias climáticas con las encontradas en el páramo de Frontino (Velásquez 2005) y los resultados de ambos estudios son importantes para entender las variaciones en la acumulación de carbono del presente estudio. Ambos estudios demuestran la ocurrencia de un período particularmente caliente y seco con las mayores temperaturas entre 1.400 y 1.300 años BP. Este período es precedido y seguido por períodos más fríos que se perciben en el aumento de la vegetación de páramo y sub-páramo y la disminución del bosque andino. Al final de este período de enfriamiento se percibe un aumento de la temperatura con la re-aparición del bosque andino. Este último período corresponde a los últimos 250 años y además del calentamiento identificado por la presencia del bosque andino, se registra un aumento considerable del nivel freático por la marcada presencia de hydrofitas (Muñoz-Uribe 2007).

La figura 4 resume los datos obtenidos a partir de las muestras tomadas en el humedal BB para concentración de carbono, datación

con  $^{14}\text{C}$ , características litológicas y tasas de acumulación de materia orgánica.

**Acumulación de materia orgánica.** La acumulación de materia orgánica y de carbono depende de la producción orgánica primaria, la descomposición primaria y secundaria, junto con procesos de escorrentía y erosión en el ecosistema (Kuhry 1988). En zonas tropicales el factor determinante parece ser no ser las altas tasas de producción, sino las bajas tasas de descomposición (Chimner & Ewel 2005), al igual que la relación C/N original de las plantas (Kuhry 1988). La descomposición generalmente aumenta con el incremento en la temperatura (Chimner & Ewel 2005) y disminuye con la latitud (Chimner & Ewel 2005). El proceso de descomposición ocurre principalmente como descomposición primaria en la capa superior aeróbica donde cae el material vegetal que muere. Este proceso se interrumpe cuando el material se incorpora en la capa anaeróbica saturada de agua. Las dos capas se conocen como acrotelm y catotelm respectivamente y su frontera la marca la profundidad promedio del nivel freático en la





**Figura 4.** Estratigrafía edáfica del humedal BB. Adaptado de Muñoz-Uribe (2007).

época seca, pero no es una línea clara (Kuhry 1988). La descomposición secundaria puede ocurrir cuando las condiciones locales se vuelven más secas como resultado de cambios en el clima y la capa catotelm se convierte en una capa aeróbica (Clymo 1998). Adicionalmente, cuando los suelos permanecen saturados, las tasas de producción de materia orgánica son significativamente menores que en suelos no saturados.

Para mostrar el efecto de las condiciones de saturación en las tasas de descomposición de materia orgánica, se midieron las tasas de descomposición de materia orgánica tanto en suelos saturados (Figura 5 izquierda), como en suelos de tierra firme (Figura 5 derecha), usando las bolsas de descomposición. Aunque los experimentos se hicieron con hojas de tres tipos de plantas y no con raíces, las tasas de descomposición en los suelos de tierra firme son mucho más rápidas que las de los humedales, para los tres materiales usados.

Los valores obtenidos para la constante de descomposición,  $k$  en el modelo de descomposición exponencial  $M_R = 100 * e^{-kt}$ , arrojan un promedio de 0,524 para los suelos de humedal y 0,962 para los suelos de tierra firme.

Las constantes de descomposición muestran que *Juncus effusus* L. (Juncaceae) se descompone más lentamente que *Eleocharis maculosa* (Vahl) Roem. & Schult. (Cyperaceae) y *Axonopus compressus* (Sw.) P. Beauv. (Poaceae) tanto en los humedales como fuera de ellos.

*pus compressus* (Sw.) P. Beauv. (Poaceae) tanto en los humedales como fuera de ellos. En un plazo de 2 años sólo entre el 12% y el 21% permanece sin descomponerse en los suelos de tierra firme, mientras que en el mismo período, el material remanente en los humedales es entre 25% y 53% dependiendo del tipo de material. Los valores de  $k$  encontrados en este estudio son menores que los encontrados para bosques en las regiones cercanas de Calarcá (Gelvez Pardo 2008) y de Pijao (Díaz Porres 2009) donde se encontraron valores entre 3,76 y 4,74; y entre 1,74 y 1,76 respectivamente.

**Concentración de carbono en los perfiles del suelo.**

La concentración promedio de carbono en los tres humedales varía entre 91 y los 319 gr C Kg<sup>-1</sup> (Tabla 1). Las diferencias se observan principalmente entre el humedal B1 que tiene mayor impacto por la ganadería y una mayor temperatura del agua por mantener una columna de agua de menor profundidad. En general los tres humedales muestran una mayor concentración de carbono en las capas superficiales, aunque en los tres casos la capa más profunda presenta concentraciones superiores a las de las capas intermedias. Las diferencias entre los tres humedales se puede observar en la Figura 6 donde el humedal BB presenta concentraciones más variables de carbono en las capas más superficiales (Figura 6 izquierda) en comparación con los humedales B1 (Figura 6 centro) y B2 (Figura 6 derecha).

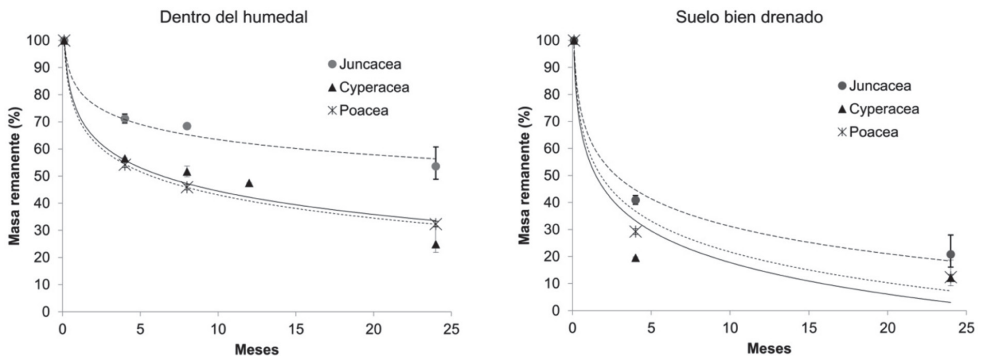
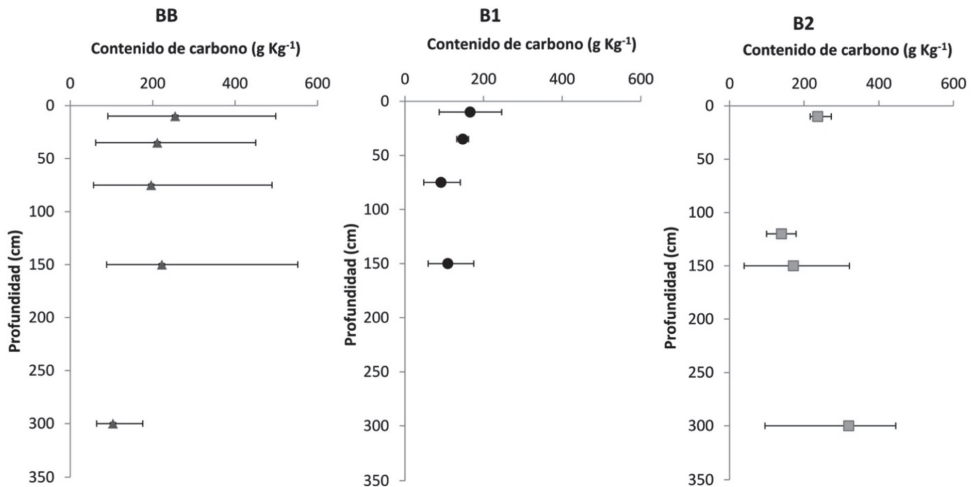


Figura 5. Descomposición de materia orgánica en humedales y en tierra firme.

**Tabla 1.** Depósitos de carbono en los humedales BB, B1 y B2.

Humedal	Area m <sup>2</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	Profundidad capa m	Contenido de C %	Contenido de C gr Kg <sup>-1</sup>	Densidad aparente gr cm <sup>-3</sup>	C acumulado por capa Kg m <sup>-2</sup>	Profundidad acumulada m	Reservas de C Kg m <sup>-2</sup>	C total Kg
BB	6,650	4,326	0-0.2	25.46	254.6	0.24	12.26	0-0.2	12.26	180,319
			0.2-0.5	21.11	211.1	0.24	15.25	0-0.5	27.51	
			0.5-1.0	19.65	196.5	0.20	19.86	0-1.0	47.36	
			1.0-2.0	22.24	222.4	0.19	41.23	0-2.0	88.60	
			2.0-3.5	10.37	103.7	0.19	28.83	0-3.5	117.43	
B1	1,070	557	0-0.2	16.56	165.6	0.30	9.78	0-0.2	9.78	24,087
			0.2-0.5	14.69	146.9	0.30	13.01	0-0.5	22.79	
			0.5-1.0	9.16	91.6	0.35	15.91	0-1.0	38.70	
			1.0-2.0	10.91	109.1	0.41	44.75	0-2.0	83.46	
B2	550	670	0-0.5	23.62	236.2	0.10	12.20	0-0.5	12.20	16,812
			0.5-1.2	13.90	139.0	0.12	11.26	0-1.2	23.46	
			1.2-2.0	17.13	171.3	0.12	15.86	0-2.0	39.32	
			2.0-3.0	31.92	319.2	0.13	41.18	0-3.0	80.50	
Area total	72,000	48,345	0-0.67	18.2	182.1	0.22	21.64	26.96	1,941,044	



**Figura 6.** Concentración de carbono en perfiles de suelo; promedio, mínimo y máximo.

Los tres humedales tienen en común las concentraciones de carbono más bajas encontradas a una profundidad de entre 0,5 y 1,2 metros, que corresponden a 19,65% para el humedal BB (profundidad de 0,5 a 1,0 m), 9,16% para el humedal B1 (profundidad de 0,5 a 1,0 m) y 13,90% para el humedal B2 (profundidad de 0,5 a 1,2 m) como se puede observar en la Tabla 1. De acuerdo con el es-

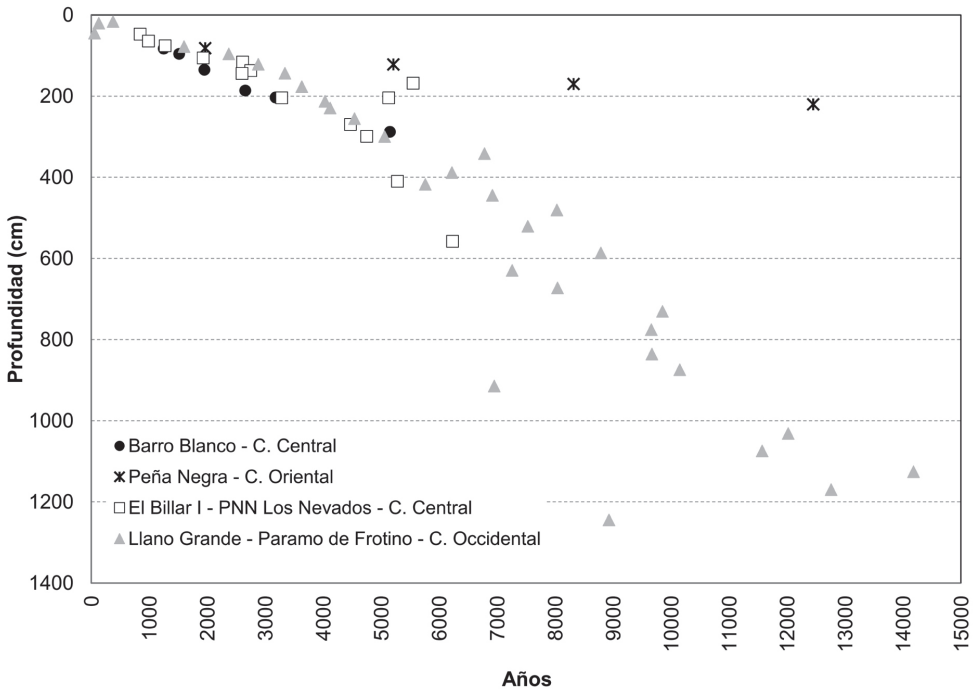
tudio palinológico (Muñoz-Urbe 2007), esta sección de la columna del suelo corresponde al período más caliente encontrado, cuyas temperaturas máximas se alcanzaron en el período 1.400 a 1.300 BP. Las altas temperaturas de este período y la relativa baja humedad encontrada también en el páramo de Frontino (Velásquez 2005) explican la consistente menor concentración de carbono en este período.

**Tasas de acumulación de suelo y de captura de carbono.** Las tasas de acumulación del suelo de largo plazo fueron estimadas a partir del análisis de  $^{14}\text{C}$  que se muestra en la Figura 7, y se presenta en forma comparada con estudios realizados en zonas de páramos en el Parque Nacional Natural de los Nevados (Melief 1985), en el páramo de Frontino (Parra *et al.* 2010) y en el páramo de Peña Negra (Kuhry 1988). La regresión lineal que relaciona edad (E) y profundidad (P) es:

$$E = 18,432 * P - 427,76 \quad (R=0,9733)$$

El incremento de suelo promedio es de 0,65  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$ , superior al encontrado por Kuhry (1988) en las turberas del páramo de Peña Negra en la cordillera oriental de Colombia, con valor promedio de 0,26  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$ , inferior al registrado por Parra *et al.* (2010) para el páramo de Frontino (cordillera Occidental) con un valor promedio de

0,97  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$ , y más cercano similar el encontrado en la zona aledaña del PNN Los Nevados (Melief 1985) con un valor promedio para 12 sitios que fueron estudiados de 0,79  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$ . Comparado con otras regiones, el incremento de suelo es la mitad de lo observado en las turberas de Cayambre en Ecuador (Chimner & Karberg 2008), pero más altas que las observadas en turberas de zonas templadas como las montañas de Colorado con una tasa de 0,25  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$  (Chimner 2000) y similares a las encontradas en zonas boreales que son en promedio 0,635  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$  (Tarnocai & Stolbovoy 2006). Esta tasa de acumulación de suelo es de cualquier manera inferior a las encontradas en otras turberas como las Chilenas con tasas de 2  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$  (Cooper *et al.* 2010), y muy inferior a las encontradas en las tierras bajas tropicales donde las tasas pueden ser superiores a los 10  $\text{mm a\~{n}o}^{-1}$  (Page *et al.* 2006).



**Figura 7.** Edad y profundidad del suelo del humedal BB en relación con los páramos Peña Negra (Kuhry 1988), Frontino (Parra *et al.* 2010) y Parque de los Nevados (Melief 1985).

Las tasas de incremento de suelo en cada horizonte muestreado se pueden observar en la Tabla 2, junto con la tasa de captura de carbono al año acumulada para cada perfil hasta obtener la tasa de captura aparente de todo el perfil del suelo.

El carbono acumulado total es de 156 kg C m<sup>-2</sup> en los últimos 5.150 años. El carbono acumulado por unidad de área en relación con la edad del humedal se muestra en la Figura 8. La tasa de acumulación de carbono de largo plazo - LARCA (por su sigla en inglés) varía entre 30 y 50 gr C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, superior, pero muy cercana a la LARCA encontrada por Kuhry (1988) para el páramo de Piedras Negras en la cordillera oriental. También son valores similares de captura de carbono a los de las turberas boreales y Ecuatorianas pero superiores a la tasa encontrada en la región ártica y en las montañas de Colorado (USA), e inferiores a las tasas encontradas en el Altiplano Chileno como se observa en la Tabla 3.

Algunos factores que determinan la acumulación de carbono se incluyen en la Tabla 4 para efectos comparativos con estudios recientes realizados en zonas tropicales, incluyendo tipo de humedal, elevación, temperatura, precipitación y pH. En esta tabla también se incluye la comparación del contenido de C, carbono acumulado y tasa de captura para diferentes profundidades. Se observa en los humedales de este estudio, un contenido de carbono en el suelo mayor que los encontrados en las ciénagas de Veracruz México, pero inferior al encontrado en las turberas de Perú. Las tasas de captura de carbono encontradas son comparables con las de Perú donde se utilizó el mismo método de datación del suelo para obtener las tasas de acumulación de largo plazo.

Otros marcadores isotópicos como el <sup>137</sup>Cs y el <sup>210</sup>Pb se utilizan para conocer las tasas de captura de carbono en los suelos en escalas de tiempo más reducidas y consideradas más apropiadas dada la escala de tiempo de

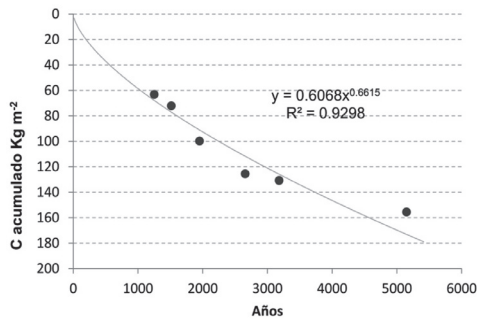
**Tabla 2.** Cálculo de las tasas de acumulación vertical de suelo y tasa anual de captura de carbono en humedal Barro Blanco.

Profundidad cm	Edad (años)	Tasa de acumulación (mm / año)	Carbono en suelo gr kg-1	Densidad aparente gr cm-3	Grosor de la capa cm	Carbono por capa kg C m-2	C acumulado en columna kg m-2	Acumulación por capa gr m-2 year-1	Acumulación en columna gr m-2 year-1
83	1250	0.66	301.86	0.25	83	63.13	63.13	50.51	50.51
96	1515	0.63	273.02	0.25	13	8.94	72.08	33.75	47.57
135	1950	0.69	281.34	0.25	39	27.65	99.72	63.56	51.14
186	2655	0.70	201.15	0.25	51	25.85	125.57	36.67	47.30
203	3180	0.64	120.96	0.25	17	5.18	130.75	9.87	41.12
288	5150	0.56	115.86	0.25	85	24.82	155.57	12.60	30.21

**Tabla 3.** Comparación de LARCA (tasa de acumulación de largo plazo) para humedales y turberas.

LARCA	gr C m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	Fuente
Humedales andinos Colombia	30	Este estudio
Turberas alto andinas Colombia	10	Kuhry 1988
Turberas alto andinas Ecuador	46	Chimner & Karberg 2008
Turberas boreales	20-30	Gorham 1991
Turberas ártico Canadá	13-17	Vardy <i>et al.</i> 2000
Turberas montañas de Colorado	25	Chimner 2000
Turberas Altiplano Chileno	70-292	Earle <i>et al.</i> 2003

ocurrencia de la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estudios realizados por Bernal & Mitsch (2013) y por Mitsch *et al.* (2013) en Costa Rica muestran tasas de captura de carbono superiores en una escala de 100 años como se observa en la Tabla 4. Si se utilizan otros métodos como los marcadores de horizontes de suelo, se pueden medir las tasas de acumulación de suelo en escalas de tiempo más cortas (2 a 10 años) como se hizo en el estudio realizado en México por Marín-Muñiz *et al.* (2014) y que arroja valores de captura de carbono aún más altas como se observa en la tabla.



**Figura 8.** Captura de carbono en perfil de edad del humedal BB.

Los diferentes métodos para la estimación de las tasas de acumulación de carbono arrojan información diferente sobre los procesos de acumulación. El indicador LARCA permite un análisis de la acumulación de carbono en el largo plazo y muestra la importancia de los pequeños humedales de elevación media, que pueden almacenar carbono a tasas en el mismo orden de magnitud que los páramos. Dadas las grandes diferencias entre las escalas de tiempo de los diferentes métodos disponibles, sería interesante conocer las tasas de acumulación para un mismo sitio mediante el empleo de los diversos métodos.

## CONCLUSIONES

El estudio de la concentración de carbono en el perfil del suelo en el largo plazo muestra que estos humedales son sensibles a los cambios

en el clima, pues la concentración más baja de carbono corresponde al período más caliente y seco de los últimos cinco mil años en la región de los Andes del norte que ocurrió entre 1.400 y 1.300 años BP.

La comparación de las tasas de acumulación de suelo en el largo plazo con estudios realizados en los páramos de Colombia permite concluir que el balance entre productividad y descomposición de materia orgánica es similar a pesar de las diferencias en elevación. En otras palabras, las tasas de descomposición en los humedales de elevación media pueden ser superiores a las de las turberas alto Andinas, pero la productividad también es mayor, por lo que las tasas de acumulación en el largo plazo son similares. La comparación en las tasas de acumulación de suelo en las tres cordilleras sugiere que el tipo de suelos y el clima local son factores muy importantes en las tasas de acumulación de suelo en el largo plazo, pues las tasas son más cercanas a las encontradas en el Parque Nacional Natural Los Nevados, que a las de páramos de las cordilleras Occidental y Oriental. Con relación a las tasas de acumulación de carbono en el largo plazo – LARCA – los valores encontrados son similares a los encontrados en sitios cercanos como la cordillera Oriental y las turberas de Cayambre en el Ecuador y en ecosistemas muy lejanos como las turberas boreales, las turberas del ártico canadiense o las turberas de las montañas de Colorado.

A pesar de tan pequeño tamaño, los humedales encontrados en la cuenca alta del río Barbas, son sumideros de carbono en concentraciones similares a las de otros humedales considerados de importancia estratégica en el ciclo global del carbono. Es posible que considerados colectivamente, los pequeños humedales encontrados de manera aislada en zonas montañosas, constituyan un importante sumidero de carbono a escala regional. La rápida degradación que están sufriendo estos ecosistemas debido a la expansión de



**Tabla 4.** Depósitos de Carbono y tasas de captura en humedales tropicales.

País	Sitio	Tipo de humedal	Elevación msnm	Temperatura promedio aire °C	Precipitación anual mm	pH	Profundidad m	Densidad aparente gr cm <sup>-3</sup>	Contenido C gr kg <sup>-1</sup>	C kg m <sup>-2</sup>	Tasa de acumulación C gr m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	Fuente	
Colombia	Rio Barbas - BB	Humedales	2000-2200	16,5	2.990	5,9	0-0,2	0,24	254,6	12,3		Este estudio	
							0-0,5	0,24	211,1	27,5			
							0-1,0	0,20	196,5	47,4	47,6 (a)		
	Rio Barbas - B1	Humedales	2000-2200	16,5	2.990	5,9	0-0,2	0,30	165,6	9,8	n.a.		
							0-0,5	0,30	146,9	22,8			
							0-1,0	0,35	91,6	38,7			
	Rio Barbas - B2	Humedales	2000-2200	16,5	2.990	5,9	0-0,5	0,10	236,2	12,2	n.a.		
							0-1,2	0,12	139,0	23,5			
							0-2,0	0,12	171,3	39,3			
Colombia	Páramo Peña Negra	Turbera	3500-3750	5-9	1.000-1.500	3,5-6,0	0-0,5	0,13	319,2	80,5		Kuhry (1988) **	
							0-0,8		18,0	65,3 (a)			
							0-1,2		40,3	20,5 (a)			
Costa Rica	Earth University	Ciénaga	50	28,0	3.460	0-0,45				3,4	465 (b)	Bernal and Mitsch (2013)	
Ecuador	Cayambre-Coca	Turberas	3.968	10,0	1.500	6,9	0-4,0	0,15	370,0	133,0	46 (a)	Chimner and Karberg (2008)	
Perú	Huayllapata	Turbera	3.881	8,1	762	0-0,3		0,46	832,3	23,0	n.a.	Segnini et al, 2010	
								0,60	634,2	30,6	n.a.		
México	Veracruz	Ciénaga Pantano	17-37	17-37	1.200-1.650	0-0,8		0,31	87,6	35,0	920,0 (c)	Marín-Muñiz et al. 2014	
								0,28	57,6	25,9	310,0 (c)		Marín-Muñiz et al. 2014
Venezuela	Delta del Orinoco	Ciénaga			2.000	2,4-9,5	0-2,8	0,15		45,0 - 97,0	n.a.	Vegas-Villarrubia et al. 2010	

(a) <sup>14</sup>C: acumulación de largo plazo (LARGA)

(b) <sup>137</sup>Cs y <sup>210</sup>Pb: acumulación de mediano plazo (últimos 100 años)

(c) Marcadores: acumulación de corto plazo (últimos 2 - 10 años)

\*\* Cálculos de tasa de acumulación con base en los datos de Kuhry (1988)

la ganadería y a la mayor variabilidad climática (veranos más prolongados y mayores temperaturas), son señales que estos depósitos tiene un alto riesgo de desaparecer, y de que el proceso de acumulación que ha durado más de 5.000 años, está siendo alterado.

Los altos contenidos de carbono encontrados en los pequeños humedales de elevación media en la cuenca alta del río Barbas, invitan a profundizar su estudio y políticas de protección en ésta y otras zonas de los Andes.

### AGRADECIMIENTOS

A Jaidy Suárez Muñoz, Wilson Celemin Marín y Mauricio Henao Galvis, por su participación en el trabajo de campo. A los profesores Hans Schreier (Universidad de British Columbia) y Armando Espinoza (Universidad del Quindío) por sus valiosos aportes en el campo. A Arnulfo Rodríguez y Jesús Galvis por su apoyo en el laboratorio de suelos del CIAT. Al profesor Georges Gorin de la Universidad de Ginebra y Paula Andrea Muñoz Uribe por compartir su interés y sus datos del estudio palinológico. A Socorro Giraldo, Gladys Cuadros y Cristina Vargas por introducirnos a los humedales del Quindío. Al profesor Orlando Rangel y a los evaluadores de la revista *Caldasia* por sus constructivos comentarios al manuscrito. Este estudio fue financiado con recursos de la American Association of University Women (AAUW), la International Foundation for Science (IFS), el International Development Research Centre (IDRC) y la Fundación Alexander von Humboldt.

### LITERATURA CITADA

BERNAL, B. & W.J. MITSCH. 2013. Carbon sequestration in freshwater wetlands in Costa Rica and Botswana. *Biogeochemistry* 115(1-3): 77-93.

BENAVIDES-DUQUE, J.C. 2013. The changing face of Andean peatlands: The effects

of climate and human disturbance on ecosystem structure and function. Ph.D. dissertation, Southern Illinois University Carbondale. 230 pp.

BJÖRK S. & B. WOHLFARTH. 2001. <sup>14</sup>C chronostratigraphic techniques in paleolimnology. pp. 205-245. En: W.M Last, W.M. & J.P. Smol. (eds.). *Tracking environmental change: Volume 1*. Kluwer, Dordrecht.

CARDOZO, A.Y.V., D. FERREIRA GOMES, E. MENDES DA SILVA, S.R.E DUQUE, J.O. RANGEL-CH., A. SIFEDDINE, B. TURCQ & A.L. SPADANO ALBUQUERQUE. 2014. Holocene paleolimnological reconstruction of high altitude Colombian tropical lake. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 415: 127-136.

CLYMO, R.S., J. TURUNEN & K. TOLONEN. 1998. Carbon accumulation in peatland. *Oikos* 81(2): 368-388.

CHIMNER, R.A. 2000. *Carbon dynamics of Southern Rocky Mountain fens*. Ph.D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO. 150 pp.

CHIMNER, R.A. & K.C. EWEL. 2005. A tropical freshwater wetland: II. Production, decomposition, and peat formation. *Wetlands Ecology and Management* 13(6): 671-684.

CHIMNER, R.A. & J.M. KARBERG. 2008. Long-term carbon accumulation in two tropical mountains peatlands, Andes Mountains, Ecuador. *Mires and Peat* 3: 1-10.

COOPER, D.J., E.C. WOLF, C. COLSON, W. VERING, A. GRANDA & M. MEYER. 2010. Alpine Peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 42(1): 19-33.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO-CRQ. 2001. Estudio hidrológico de los humedales cuenca superior Río Barbas, Municipio de Filandia. CRQ, Armenia. 81 pp.

DE WILDE, A. 1998. Humedales del Departamento del Quindío, Inventario preliminar. Informe CRQ, Armenia. 75 pp.

- DÍAZ PORRES, M. 2009. Producción – descomposición de hojarasca y macroinvertebrados fragmentadores en cuatro agroecosistemas de la cuenca del Río La Vieja. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira. 113 pp.
- EARLE, L.R., B.G. WARNER & R. ARAVENA. 2003. Rapid development of an unusual peat accumulating ecosystem in the Chilean Altiplano. *Quaternary Research* 59(1): 2-11.
- ENRÍQUEZ, A.S., R.A. CHIMNER, M.V. CREMONA, P. DIEHL & G.L. BONVISSUTO. 2015. Grazing intensity levels influence C reservoirs of wet and mesic meadows along a precipitation gradient in Northern Patagonia. *Wetlands Ecology & Management* 23(3): 453-466.
- GELVEZ PARDO, I.M. 2008. Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos (cuenca del Río La Vieja, Quindío). Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 66 pp.
- GONZÁLEZ-CARRANZA, Z., H. HOOGHIEMSTRA & M.I. VÉLEZ. 2012. Major altitudinal shifts in Andean vegetation on the Amazonian flank show temporarily loss of biota in the Holocene. *The Holocene* 22(11): 1227-1241.
- GORHAM, E. 1991. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1(2): 182-195.
- GROOT, M.H.M., R.G. BOGOTÁ-A., L.J. LOURENS, H. HOOGHIEMSTRA, M. VRIEND, J.C. BERRIO, E. TUENTER, J.H. VAN DER PLICHT, B. VAN GEEL, M. ZIEGLER, S.L. WEBER & 14 OTHER FÚQUENE PROJECT MEMBERS. 2011. Ultra-high resolution pollen record from the northern Andes reveals rapid shifts in montane climates within the last two glacial cycles. *Climates of the Past* 7(1): 299-316.
- GUARÍN, F., G. GORIN & A. ESPINOSA. 2004. A Pleistocene stacked succession of volcanoclastic mass flow in Central Colombia: the Quindío-Risaralda fan. *Acta Vulcanologica* 16(1-2): 109-124.
- HELMENS, K.F. & P. KUHR. 1986. Middle and Late Quaternary vegetational and climatic history of the Páramo de Agua Blanca (Eastern Cordillera, Colombia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 56(1-4): 291-335.
- HIRANO, T., H. SEGAI, T. HARADA, S. LIMIN, T. JUNE, R. HIRATA & M. OSAKI. 2007. Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biology*, 13(2): 412-425.
- HOOGHIEMSTRA, H. & J.C. BERRIO. 2007. Pollen records, Late Pleistocene/South America. pp. 2648-2660. En: S.A. Elias (ed.). *Encyclopedia of Quaternary Science*, Elsevier, Amsterdam.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI-IGAC. 1996. Suelos Departamento del Quindío. CRQ, Armenia, 251 pp.
- JARAMILLO, G.A., A.I. PAREJA-BOLIVAR, P. ROJAS-SÁNCHEZ, J.C. OROZCO-SERNA & E. GIRALDO-HERRERA. 2001. Evaluación preliminar del estado de los recursos naturales en el departamento del Quindío. Reporte CRQ, Armenia, 213 pp.
- KUHR, P. 1988. Palaeobotanical-Paleoecological Studies of Tropical High Andean Peatbog Sections (Cordillera Oriental, Colombia). *Dissertationes Botanicae*. J. Cramer, Berlín. 241 pp.
- LAL, R. 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1492): 815-830.
- MARCHANT, R., H. BEHLING, J.C. BERRIO, A. CLEEF, J. DUIVENVOORDEN, H. HOOGHIEMSTRA, P. KUHR, B. MELIEF, E. SCHREVE-BRINKMAN, B. VAN GEEL, T. VAN DER HAMMEN, G. VAN REENEN & M. WILLE. 2002. Pollen-based biome reconstructions for Colombia at 3000, 6000, 9000, 12000, 15000 and 18000 <sup>14</sup>C yr ago: Late Quaternary tropical vegetation dynamics. *J. Quaternary Science* 17(2): 113-129.
- MARCHANT, R. & H. HOOGHIEMSTRA. 2004. Rapid environmental change in African and South American tropics around 4000 years before present: a review. *Earth Science Reviews* 66: 217-260.

- MARÍN-MUÑOZ, J.L., M.E. HERNÁNDEZ & P. MORENO-CASASOLA. 2014. Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico. *Plant Soil* 378: 189-203.
- MELIEF, A.B.M. 1985. Late Quaternary Paleocology of the Parque Nacional Natural Los Nevados (Cordillera Central), and Sumapaz (Cordillera Oriental) area, Colombia. Ph.D. dissertation, University of Amsterdam. 162 pp.
- MITSCHEW, W.J., B. BERNAL, A.M. NAHLIK, Ü. MANDER, L. ZHANG, C.J. ANDERSON, S.E. JØRGENSEN & H. BRIX. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology* 28: 583-597.
- MUÑOZ-URIBE, P.A. 2007. Evolution paléoenvironnementale de l'Holocène récent dérivée de l'enregistrement palynologique dans une zone humide de moyenne montagne du département du Quindío (Colombie Centrale). MSc Thesis. University of Geneva. 89 pp.
- NELSON, D.W. & L.E. SOMMERS. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 961-1010. En: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soluanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnson & M.E. Summer (eds.). *Methods of Soil Analysis part 3*. Soil Science Society of America & American Society of Agronomy, Madison.
- PAGE, S.E., J.O. RIELEY & R. WÜST. 2006. Lowland tropical peatlands of Southeast Asia. pp. 145-172. En: I.P. Martini, A. Martínez Cortizas & W. Chesworth (eds.). *Peatlands: Evolution and Records of Environmental and Climate Changes*. Elsevier, Amsterdam.
- PAGE, S.E., J.O. RIELEY & C.J. BANKS. 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17(2): 798-818.
- PANT, H., J. RECHCIGL & M. ADJEL. 2003. Carbon sequestration in wetlands: concept and estimation. *Journal of Food Agriculture & Environment* 1(2): 308-313.
- PARRA, L.N., J.O. RANGEL-CH. & T. VAN DER HAMMEN. 2010. Cronología e isotopía  $\delta^{13}\text{C}$  de la turbera Llano Grande, Páramo de Frontino (Antioquia, Colombia). pp. 43-66. En: J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia diversidad biótica X. Cambios global (natural) y climático (antrópico) en el páramo colombiano*. Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá D.C.
- PRINGENT, C., F. PAPA, F. AIRES, C. JIMENEZ, W.B. ROSSOW & E. MATHEWS. 2012. Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geophysical Research Letters*, 39(8), L08403, doi:10.1029/2012GL051276.
- RESTREPO, G. & L.G. NARANJO. 1987. Recuento histórico de la disminución de humedales y la desaparición de aves acuáticas en el valle geográfico del río Cauca. pp. 43-45. En: H.A. Lopez, G. Kattán & C. Murcia (eds.). *Memorias III Congreso de Ornitología Neotropical*. Sociedad Vallecaucana de Ornitología, Cali.
- RICAURTE, L.F., K.M. WANTZEN, E. AGUDELO, B. BETANCOURT & J. JOKELA. 2014. Participatory rural appraisal of ecosystem services of wetlands in the Amazonian Piedmont of Colombia: elements for a sustainable management concept. *Wetlands Ecology & Management* 22(4): 343-361.
- ROA-GARCÍA, M.C., S. BROWN, H. SCHREIER & L.M. LAVKULICH. 2011. The role of land use and soil in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research* 47(5): 1-12.
- ROA-GARCÍA, M.C. & M. WEILER. 2011. Distribución de los tiempos de respuesta y tiempos de tránsito del agua para comparar cuencas con diferentes usos del suelo en el contexto de adaptación al cambio climático. En: L.D. Sánchez, A. Galvis, I. Restrepo & M. Peña (eds.). *Gestión Integrada del recurso hídrico frente al cambio climático*. Programa Editorial, Universidad del Valle, Cali.
- SEGNINI, A., A. POSADA, R. QUIROZ, D. MARCONDES BASTOS PEREIRA MILORI, S.

- COSTA SAAB, L. MARTIN NETO & C.M. PEDRO VAZ. 2010. Spectroscopic Assessment of Soil Organic Matter in Wetlands from the High Andes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(6): 2246-2253.
- TAN, K.H. 2005. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. 2nd ed. Taylor and Francis Group, CRC Press, Boca Raton. 680 pp.
- TARNOCAI, C. & V. STOLBOVOY. 2006. Northern peatlands: their characteristics, development and sensitivity to climate change. pp. 17-51. En: I.P. Martini, A. Martínez Cortizas & W. Chesworth (eds.). *Peatlands: Evolution and Records of Environmental and Climate Changes*, Elsevier, Amsterdam.
- VARDY, S.R., B.G. WARNER, J. TURUNEN & R. ARAVENA. 2000. Carbon accumulation in permafrost peatlands in the Northwest Territories and Nunavut, Canada. *The Holocene* 10(2): 273-280.
- VEGAS-VILARRÚBIA, T., F. BARITTO, P. LÓPEZ, G. MELEÁN, M.E. PONCE, L. MORA & O. GÓMEZ. 2010. Tropical Histosols of the lower Orinoco Delta, features and preliminary quantification of their carbon storage. *Geoderma* 155(3-4): 280-288.
- VELÁSQUEZ-RUIZ, C.A. 2005. *Paleoecología de alta resolución del Holoceno tardío en el Páramo de Frontino Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. 199 pp.
- VELÁSQUEZ-RUIZ, C.A. & H. HOOGHIEMSTRA. 2013. Pollen-based 17-kyr forest dynamics and climate change from the Western Cordillera of Colombia; no-analogue associations and temporarily lost biomes. *Review of Paleobotany and palynology* 194: 38-49.
- WIEDER, R.K. & G.E. LANG. 1982. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology* 63(6): 1636-1642.

Recibido: 17/01/2015

Aceptado: 24/04/2016

