

Carbono almacenado en páramo andino *

Abel Efrén Castañeda-Martín

Ingeniero Agroforestal, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Miembro del grupo de investigación GIES.
abeefrencm8@gmail.com

Carmen Rosa Montes-Pulido

Ingeniera Forestal. Msc, PhD en Desarrollo Sostenible. Miembro del Grupo de investigación GIES. Docente asociada, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Bogotá - Colombia.  <http://orcid.org/0000-0003-1560-3464>
carmen.montes@unad.edu.co

RESUMEN

A pesar de la importancia del ecosistema de páramo en el ciclo global de carbono no se dispone de una síntesis que permita diferenciar si es la biomasa vegetal o el suelo el componente que acumula la mayor cantidad de carbono. En este documento se busca integrar los aspectos fundamentales relacionados con el carbono almacenado en el ecosistema de páramo, a través de: 1) Revisar las estimaciones de carbono en biomasa aérea y suelo reportadas por la literatura para el ecosistema de páramo; 2) Examinar los efectos producidos por la actividad agropecuaria en el carbono almacenado en el páramo y 3) Identificar prácticas que reducen las emisiones de carbono en el páramo. Se revisaron artículos en bases de datos como *Science Direct*, *Springerlink*, *Wiley Online Library* y *Google Scholar*. El componente que almacena mayor cantidad de carbono en páramo es el suelo, con contenidos entre 119 y 397 t/ha en los primeros 40 cm de profundidad. Mientras que la biomasa aérea varía entre 13,21 y 183 t/ha. Es necesario incrementar las investigaciones sobre carbono orgánico en suelos de páramo. Esta información podría contribuir a apoyar acciones tendientes a vincular los ecosistemas de páramo al mercado de carbono.

PALABRAS CLAVE

Biomasa aérea, carbono en suelos, buenas prácticas agrícolas, carbono en alta montaña, ecosistema de páramo.

Carbon stock in andean paramo

ABSTRACT

Despite the importance of the paramo ecosystem in the global carbon cycle, there is not an available synthesis for identifying if plant biomass or soil accumulates the maximum amount of carbon. The purpose of this document is to focus on paramo ecosystem stock carbon, through: 1) to review estimates for the aboveground biomass and soil organic carbon; 2) to examine the agricultural production effects on carbon storage, and 3) to identify management practices for reducing carbon emissions in the paramo ecosystem. We searched papers about carbon storage in paramo in databases like *Science Direct*, *Springerlink*, *Wiley Online Library* y *Google Scholar*. Soil stored more carbon than aboveground biomass. Soil carbon organic (SOC) between 119 and 397 t/ha was stored in the upper 40 cm. Meanwhile, aboveground biomass carbon varied between 13,21 y 183 t/ha. More studies about SOC are required. This information could contribute to support actions over the entailment of paramo ecosystem in carbon markets.

KEYWORDS

Aboveground biomass, carbon in soils, better agricultural practices, carbon in high mountains, paramo ecosystem

Recibido: 10/07/2016 Aceptado: 25/10/2016

* Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado "Secuestro de carbono por suelo y biomasa asociada a *Espeletia* sp, en el páramo de Sumapaz, Colombia", registrado en la vicerrectoría Académica y de Investigación de la UNAD y financiado por la UNAD.

<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Cómo citar este artículo: CASTAÑEDA-MARTÍN, Abel Efrén; MONTES-PULIDO, Carmen Rosa. Carbono almacenado en páramo andino. *En*: Entramado. Enero - Junio, 2017. vol. 13, no. 1, p. 210-221 <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>



O carbono armazenado no paramo andino

R E S U M O

Apesar da importancia do ecosistema de páramo no ciclo global do carbono non está dispoñible unha síntese para diferenciar se é a biomasa vexetal ou solo, o componente que acumula a maior parte do carbono. Este traballo procura integrar os aspectos fundamentais do carbono almacenado no ecosistema páramo, por medio de: 1) Rever as estimativas de carbono na biomasa e no solo relatado pola literatura para o ecosistema páramo; 2) Analisar os efectos da actividade agrícola no carbono almacenado no páramo e 3) Identificar prácticas que reducen as emisións de carbono no páramo. Artigos foron revisados en bases de datos, tales como *Science Direct*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library* e *Google Scholar*. O componente que almacena a maior parte do carbono é o solo, con contidos entre 119 e 397 t/ha nos primeiros 40 cm de profundidade. Enquanto a biomasa varía entre 13,21 e 183 t/ha. É preciso acrescentar a investigación sobre carbono orgánico no solo en páramo. Esta información podería axudar a apoiar as accións para vincular os ecosistemas de Páramo ao mercado de carbono.

PALAVRAS-CHAVE

Biomasa Aérea, Carbono no solo, boas prácticas agrícolas, carbono en alta montaña, ecosistema de páramo.

Introducción

La medición y el monitoreo de carbono en ecosistemas de alta montaña se ha tornado un importante tópico de investigación en los años recientes, como resultado del cambio climático. Particularmente, es importante su cuantificación para disponer de datos empíricos en las negociaciones para reducir las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a deforestación y degradación forestal (REED) (Goetz & Dubayah, 2011). Así mismo, los registros de carbono en páramo contribuyen a conocer y mejorar la cuantificación de sumideros y flujos de carbono en estos entornos (Hall *et al.*, 2011; Houghton, 2007; Herold & Skutsch, 2011). Aunque los ecosistemas tropicales de alta montaña se distinguen por su provisión de servicios hidrológicos (Martínez *et al.*, 2009) y la protección de la biodiversidad (Martínez *et al.*, 2009; Gentry, 1992) su rol en almacenamiento de carbono es menos conocido. Así que disponer de una síntesis del carbono almacenado en el páramo podría contribuir a destacar la función de este ecosistema en la política internacional de cambio climático, por lo que puede ayudar a fundamentar la adopción de incentivos económicos para apoyar un mejor manejo de los recursos naturales en estos ecosistemas (Ward *et al.*, 2015).

El presente estudio pretende integrar los aspectos fundamentales que determinan el carbono almacenado en el ecosistema de páramo. Para ello se busca responder a dos preguntas que inquietan a los tomadores de decisiones para definir la gestión del territorio en este ecosistema: 1) ¿Cuál de los componentes del páramo es más eficaz en el almacenamiento de carbono? y 2) ¿Qué implicaciones tienen las actividades agropecuarias en el carbono almacenado en páramo?. El documento inicia presentando las mayores reservas del carbono en el planeta; a continuación se mencionan las características generales del páramo; posteriormente se

sintetizan los avances en estimaciones de carbono almacenado en biomasa aérea y en suelo de este ecosistema; seguidamente se describe la forma en que las actividades agropecuarias afectan el carbono en el páramo, así como prácticas agrícolas que pueden mitigar sus pérdidas. Finalmente, para responder a incertidumbres sobre carbono almacenado se proponen algunas líneas futuras de investigación en este ecosistema.

1. Mayores reservas de carbono en el planeta

Las cuatro mayores reservas son la atmósfera, los océanos, existencias de combustibles fósiles y ecosistemas terrestres, incluyendo vegetación y suelos. Las cantidades anuales de carbono intercambiadas por procesos como erosión, vulcanismo y formación de rocas sedimentarias durante milenios, han sido pequeñas y generalmente ignoradas en las existencias de carbono cuantificadas (Sundquist & Visser 2004).

La atmósfera. En el 2005, el promedio global de concentración de CO₂ estuvo cercano a 0,0380% ppmv (partes por millón por volumen), equivalente a aproximadamente 805 PgC (1 Pg= 1 pentagramo = 10¹⁵ g= 10⁹ toneladas métricas). El metano (~1,7 ppm), monóxido de carbono (~0,1 ppm), e hidrocarburos no metánicos son otros gases que contienen carbono pero que desde el punto de vista del equilibrio de carbono global pueden ser ignorados (Houghton, 2007).

Los océanos. La cantidad total de carbono en los océanos del mundo es de aproximadamente 38000 pentagramos de carbono (PgC). Es decir, cerca de 50 veces más carbono que en la atmósfera. La mayoría del carbono del océano se encuentra en aguas intermedias y profundas. Únicamente entre 700-1000 PgC están en la superficie del océano en

contacto directo con la atmósfera. También 6000 PgC de carbono reactivo se hallan en los sedimentos del océano. Aunque este último es importante en la determinación de concentración de CO₂ a largo plazo en la atmósfera y océanos, es menos importante en el ciclo del carbono en el corto plazo (Houghton, 2007).

La mayoría de los gases no son solubles en agua, por lo cual predominan en la atmósfera. Por ejemplo, solo cerca del 1% del oxígeno del planeta está en el océano y el 99% está en la atmósfera. Sin embargo, la distribución de carbono entre el aire y el mar está invertida: 98.5% del carbono del sistema océano-atmósfera está en el mar, debido a la química del agua de mar. Casi todo el carbono existe como carbono inorgánico disuelto (CID) y la mayoría del CID se halla en forma de bicarbonato y iones de carbonato. Menos del 1% del CID está en forma de CO₂ disuelto (Sarmiento *et al.*, 1993). Aproximadamente 1000 PgC del CID es orgánico. La mayoría de este último se encuentra en forma disuelta y aproximadamente 3 PgC está en los organismos vivos (Houghton, 2007).

Ecosistemas terrestres: Vegetación y suelo. El carbono integra cerca de 0.27% de la masa de los elementos de la corteza terrestre (Kempe 1979), aun cuando representa aproximadamente el 50% de la materia seca. La cantidad de carbono contenida en la vegetación terrestre es del orden de 550±100 Pg. La materia orgánica en suelos es 2 a 3 veces esta cantidad (1500-2000 PgC en el primer metro del suelo y 2300 Pg en los primeros 3 metros (Jobágyy & Jackson, 2000). Los bosques son particularmente importantes como reservorios de carbono porque los árboles almacenan más carbono por unidad de área que otros tipos de vegetación (Houghton, 2007).

Los combustibles fósiles. El carbono, el petróleo y el gas natural son los residuos de materia orgánica formada hace millones de años por las plantas verdes. La cantidad de carbono almacenado en combustibles fósiles se estima entre 5000-10000 PgC. Mayor que cualquier otro reservorio, excepto a la profundidad del mar y aproximadamente 10 veces el contenido de carbono de la atmósfera (Houghton, 2007).

2. Métodos de cuantificación de carbono en biomasa aérea y suelo

2.1. Métodos empleados para estimar biomasa

La biomasa forestal, definida como la cantidad total de materia orgánica viva de árboles, expresada en toneladas secas por unidad de área, permite estimar el carbono almacenado

en los bosques, dado que el 50% de ella está integrada por carbono (Brown, 1997). Incluye la biomasa aérea y subterránea de la masa viva, como árboles, arbustos, hierbas, raíces y la masa muerta de la hojarasca y residuos gruesos y finos asociados con el suelo (Lu, 2006). En el bosque húmedo tropical el estudio de la biomasa es dispendioso debido a su complejidad, expresada en su estructura y variada composición de especies (Lu *et al.*, 2005). Sin embargo, cada día son más los estudios en estos temas, especialmente de biomasa aérea, que utilizan metodologías variadas, por lo que se genera una gran incertidumbre respecto a cuál es la mejor, en precisión.

Hay dos formas de abordar las estimaciones de biomasa, de acuerdo con el tipo de método utilizado: Métodos de mediciones directas en parcelas y métodos indirectos. Los primeros implican medir por parcela el diámetro, la altura y la densidad de la madera. A partir de allí hay dos opciones: la extracción y fraccionamiento del árbol para tomar el peso húmedo de tronco, ramas, flores y frutos (Klinge *et al.*, 1975) o el desarrollo de ecuaciones alométricas con los valores obtenidos en campo (Nelson *et al.*, 1999). Para el primer caso, una vez seccionado el árbol se registra *in situ* el peso húmedo de sus partes, se lleva al laboratorio para deshidratarlas y obtener su peso seco. Esta información se utiliza posteriormente para predecir la biomasa por árbol, mediante regresiones que generan un modelo.

Un método indirecto consiste en utilizar la información de volumen de madera obtenida a partir de inventarios de bosque para convertirlos a biomasa (Brown & Lugo, 1992). Este método es preciso para zonas específicas, aunque tiene como desventajas el ocupar mucho tiempo, alto costo y ser poco práctico para niveles de análisis de país (Feldspausch *et al.*, 2012).

De manera directa o indirecta, con los datos de campo se construyen modelos mediante el uso de programas estadísticos. Para seleccionar la ecuación de mejor ajuste se comprueban los supuestos de análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Aquellos que no cumplen los supuestos son eliminados. Seguidamente se calculan indicadores de ajuste como coeficiente de determinación ajustado (R²) el error estándar de la estimación y la suma de los cuadrados de los residuos de los predichos. También se calcula la capacidad predictiva de los modelos mediante el error cuadrático medio y la diferencia agregada. Para modelos con transformaciones logarítmicas se aplica un factor de corrección (Fonseca *et al.*, 2009). En otros casos, el mejor modelo se elige mediante la aplicación del criterio de información Akaike, el error residual estándar y el error relativo estimado (Álvarez *et al.*, 2012).

2.2. Métodos para estimar carbono en suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es una medida de la cantidad total de carbono orgánico en el suelo. El interés en COS se fundamenta en que esta medida es un indicador de calidad de suelo. En consecuencia, su variación puede tener implicaciones en procesos ambientales como fertilidad de suelo, erosión y flujos de gases efecto invernadero (Stolbovoy *et al.*, 2007).

Determinar el carbono en el suelo con alta precisión es esencial para cuantificar el secuestro de carbono. Se han desarrollado métodos *ex situ* e *in situ* que incrementan la precisión y la costo-efectividad. Los métodos *ex situ* involucran coleccionar muestras representativas de suelo para medir la concentración de carbono mediante técnicas de combustión seca o húmeda. Este último proceso involucra la oxidación de material orgánico mediante una mezcla de ácidos y la medición del CO₂ por métodos gravimétricos o manométricos (Chatterjee *et al.*, 2009). En la actualidad se utilizan métodos automatizados denominados analizadores de carbono total. Estos se fundamentan en la medición de conductividad térmica de los gases emitidos (Tabatabai *et al.*, 1991).

Los métodos *in situ* plantean alta precisión sin ocupar mucho tiempo en el procesamiento y análisis de muestras. Están basados en sensores remotos y mediciones espectroscópicas en campo. Los métodos espectroscópicos incluyen reluctancia infrarroja cercana (NIR, por sus siglas en inglés) e intermedia y espectroscopia de plasma inducida por láser (LIBS, por sus siglas en inglés). El potencial de estos métodos se evalúa al comparar los resultados con los obtenidos mediante análisis de las muestras de suelo por el método de combustión seca. (Chatterjee *et al.*, 2009).

3. El ecosistema de páramo

Los páramos son paisajes bioclimáticos desarbolados y fríos, localizados entre los 3.200 y 3.800 m de altitud (Cuatrecasas, 1989). Son propios de las montañas neotropicales de Costa Rica, Panamá y los Andes de Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte del Perú (Luteyn, 1999). Los páramos de la cordillera de los Andes son ecosistemas de la parte alta de la montaña, con una gran variedad de lagos y turberas. La vegetación está integrada mayoritariamente por vastas áreas de gramíneas naturales como *Calamagrostis effusa*, grandes plantas arrosetadas como el frailejón (*Espeletia*, sp.) (Hofstede, 1995), mezcladas con matorrales, donde predominan arbustos de los géneros *Castilleja*, *Diplostephium*, *Hypericum* y *Pentacalia* y parches de bosque que pueden alcanzar hasta los 10 m de altura como el *Polylepis*

quadrijuga, *Escallonia myrtelloides* y *Hesperomeles obtusifolia* (Pedraza *et al.*, 2005).

Los páramos cubren las partes altas de los Andes, entre los 11° N y 8° latitud S, formando una banda discontinua entre la Cordillera de Mérida, en Venezuela, y la depresión de Huancabamba, en el norte del Perú. Además, existen dos páramos complejos separados. Uno en Costa Rica y el otro en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Hofstede *et al.*, 2003). Ecosistemas similares se encuentran en otros continentes. Vegetación herbácea dominada por macollas de gramíneas o pajonales naturales, semejantes a la del páramo están presentes en el cinturón afroalpino, desde Etiopía y Uganda hasta Kenya, Tanzania y Suráfrica (Hedberg, 1992). Una pequeña extensión ocurre en Nueva Guinea e Indonesia (Hofstede *et al.*, 2003). Los páramos de Suramérica cubren entre 35.000 km² y 77.000 km². Esta discrepancia se debe a incertidumbres relacionadas con el límite inferior del páramo, el cual estaría situado sobre los 3.800 m de altitud (Dinerstein *et al.*, 1995; Hofstede *et al.*, 2003).

La ocurrencia aislada y fragmentada de páramo en el altiplano andino promueve alta especialización y gran endemismo. Alberga cerca de 5.000 especies diferentes de plantas. Cerca del 60% son endémicas, adaptadas a las condiciones físico-químicas de suelo y a las climáticas, tales como baja presión atmosférica, intensa radiación ultravioleta y los efectos de secamiento del viento (Hofstede, 1995).

El clima del páramo es típico de trópico de alta montaña. En general, es frío y húmedo, acompañado de súbita niebla, llovizna y cambios rápidos de temperatura y radiación solar en el transcurso del día. Por su cercanía a la línea del Ecuador la radiación solar es casi permanente durante todo el año. Esta constancia contrasta con el ciclo diario. Durante el día, las variaciones de temperatura son mayores a 20°C presentándose “un verano durante el día e invierno en la noche” (Hedberg, 1964). La variación local de la temperatura depende del gradiente altitudinal y de la humedad del aire. La tasa altitudinal a la cual cambia la temperatura promedio es de 0,65°C por cada 100 metros (van der Hammen & Hooghiemstra, 2000). La humedad del aire también afecta a la temperatura diaria. En temporadas con alta nubosidad, la radiación solar total a nivel del suelo es baja durante el día; mientras que la humedad relativa alta en la noche hace que la temperatura no baje tanto, debido a la salida de radiación de calor desde el suelo y la vegetación (Buytaert *et al.*, 2006).

La precipitación en el páramo es variable, desde 700 mm a 3.000 mm/año (Luteyn, 1992), con algunos extremos en áreas que alcanzan los 6.000 mm (Rangel, 2000). Su variabilidad a pequeña escala está determinada por cambios en la dirección y la velocidad del viento, que a su vez están

controladas por la pendiente y la topografía. A gran escala, el patrón de precipitación está afectado por las cuencas Pacífica y Amazónica. En los Andes del norte de Venezuela, Colombia y Costa Rica, los vientos del noreste causan una marcada estación seca. Las laderas occidentales de Colombia y norte del Ecuador están afectadas por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre el Pacífico Este (Vuille *et al.*, 2000). La ZCIT es responsable de humedad continua en forma de lluvia, nubes y niebla, producto de la elevación orográfica. Finalmente los páramos de la ladera occidental del sur del Ecuador y norte de Perú están afectados por las masas frías y secas de la corriente de Humboldt y por lo tanto son más secas, excepto durante el fenómeno del Niño (Luteyn, 1999). En general, el clima del páramo es frío y húmedo, acompañado de súbita niebla, llovizna y cambios rápidos de temperatura y radiación solar en el transcurso del día.

A pesar de la compleja geología y topografía de los Andes, los suelos del páramo son bastante homogéneos (Buytaert *et al.*, 2006). Muchos suelos de páramo son de origen volcánico. Ellos forman una capa uniforme que cubre el lecho de roca terciaria en las cordilleras andinas. Dependiendo de la ubicación, el espesor del suelo oscila de unos pocos centímetros a varios metros. Los suelos más comunes son los Andisoles, Entisoles e Inceptisoles en la clasificación de taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1998) o Andosoles e Histosoles en la base de recursos del suelo de la FAO (1998). En los Andes, los suelos localizados a elevaciones mayores a 2.700m son catalogados como Andisoles. Mientras que los ubicados por debajo de 2.700m pueden ser clasificados como Entisoles o Inceptisoles (Zehetner *et al.*, 2003), dependiendo del contenido de arcilla (Zehetner *et al.*, 2006). El Entisol no muestra desarrollo de perfiles, está expuesto a menor precipitación y alta evapotranspiración. Como resultado los materiales amorfos están ausentes y la fracción coloidal está dominada por haloisita, o mineral de arcilla con aluminosilicatos (Zehetner *et al.*, 2006). El Inceptisol, más desarrollado que el Entisol, está expuesto a altas precipitaciones y baja evapotranspiración, tiende también a ser más lixiviado. Esto favorece la formación de materiales amorfos como la alófana en el suelo superficial (Wada, 1980).

El clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de materia orgánica en el suelo. Esta acumulación se mejora por la formación de complejos organometálicos, entendidos como una asociación entre materia orgánica y partículas minerales de suelo (Al^{3+} ; Fe^{3+}) (Wagai *et al.*, 2015). Esta asociación tiende a ser estable y resistente a la descomposición microbiana. El aluminio y hierro de estos complejos proviene de la descomposición de la ceniza volcánica y roca. Los suelos resultantes son oscuros y húmicos y tienen una estructura porosa (Nanzyo *et al.*, 1993).

Desde el punto de vista físico, los suelos de páramo tienen características comunes con los de turba en zonas altas. Contienen cantidades elevadas de materia orgánica, la cual está cerca de 100 g/kg. En sitios húmedos (>900 mm/año), es frecuente el contenido de carbono orgánico mayor a 40%. (Buytaert *et al.*, 2006). Lugares con depósitos de cenizas se caracterizan por presentar suelos jóvenes con contenido de carbono orgánico de 4-10% (Zehetner *et al.*, 2003).

4. Carbono almacenado en la biomasa aérea del páramo

Los bosques cubren globalmente 4.03 billones de hectáreas. Es decir, aproximadamente el 30% de la superficie total de la Tierra (FAO, 2010). Estos cuentan con el 80% del total de biomasa vegetal del planeta (Kindermann *et al.*, 2008). Los bosques se distribuyen a lo largo del globo. En Asia, incluyendo el área rusa, se encuentra el 31% del total de bosques del planeta, seguido por el 21% en Sudamérica, 17% en África, 17% en Norte y Centroamérica, 9% en Europa y 5% en Oceanía (FAO, 2010).

En bosques naturales no alterados de alta montaña tropical (entre 1.000 m y 3.600 m de altitud) la biomasa aérea está entre 77t/ha y 785t/ha. Esta variación puede deberse en parte a los cambios de altitud, topografía, temperatura y precipitación (Spracklen *et al.*, 2014).

En páramos, el carbono en biomasa varía entre 13,21 y 183 t/ha. (Tabla 1). Algunos estudios sugieren que esta diferencia puede deberse a variaciones ambientales. Por ejemplo, se reportan correlaciones positivas y débiles entre biomasa aérea con la temperatura media anual, precipitación media anual, altitud y ángulo de pendiente (Spracklen *et al.*, 2014). Sin embargo, otros estudios indican ausencia de correlación de biomasa aérea con variables climáticas y topográficas (Slik *et al.*, 2010).

Parámetros ambientales como disponibilidad de nutrientes, propiedades del suelo, exposición a luz ultravioleta, exposición a la luz, nubosidad o velocidad del viento pueden ser importantes en el carbono almacenado en la biomasa. Incremento en la limitación de nitrógeno y disminución en las limitaciones de fósforo frente al aumento de rango altitudinal en los Andes peruanos podrían incidir en la cantidad de biomasa aérea del páramo (Fischer *et al.* 2013). Estudios de productividad primaria neta a lo largo de transectos altitudinales arrojaron cambios abruptos a elevaciones específicas. Estos cambios pueden estar relacionados con la frecuencia de nubosidad que a su vez controla la cantidad de luz y la humedad del sitio (Girardin *et al.*, 2010, 2014a). Por ejemplo, la productividad primaria neta en dos sitios montañosos de los Andes estuvo asociada a radiación solar y nu-

Tabla 1.

Carbono orgánico almacenado en biomasa aérea en paramos de Suramérica

Localización	Altitud	Biomasa aérea (t/ha)	tC/ha	TMA (°C)	Precipitación (mm/año)	Tamaño de parcela (ha)	Ecuación	Referencia
Bosque de Aliso de Oyacachi, Cayambe-Coca,	3200	241	120,5	10,5	2250	0,3	Fehse <i>et al.</i> (2002)	Fehse <i>et al.</i> (2002)
Bosque de <i>Polylepis</i> sp Provincia de Pichincha, Ecuador	3600	366	183	8	1500	0,3	Fehse <i>et al.</i> (2002)	Fehse <i>et al.</i> (2002)
Bosque tropical de montaña, SE Perú	3020	94	47	11,8	1776	1	Chave <i>et al.</i> (2005) ¹	Girardin <i>et al.</i> (2010)
Bosque tropical de montaña, SE Perú	3025	130	65	12,5	1706	1	Chave <i>et al.</i> (2005) ¹	Girardin <i>et al.</i> (2010)
Parque Nacional Podocarpus, Ecuador	3060	100	50	8,6	4500	0,16	Chave <i>et al.</i> (2005) ¹	Moser <i>et al.</i> (2011);
Parque Nacional Manu, Challabamba, Perú	3100	198	99	-	-	0,1	Román-Cuesta <i>et al.</i> (2011) ²	Román-Cuesta <i>et al.</i> (2011)
Parque Nacional Manu, laguna-Acjanaco, Perú	3400	169	84,5	-	-	0,1	Román-Cuesta <i>et al.</i> (2011) ²	Román-Cuesta <i>et al.</i> (2011)
Bosque <i>Polylepis</i> , Parque Nacional Nor Yauyos Cochas, Perú	4200	38	19	-	-	0,1	Vásquez <i>et al.</i> (2014) ³	Vásquez <i>et al.</i> (2014)
Bosque de <i>Chusquea</i> sp en Parque Nacional Chingaza, Cundinamarca, Colombia	3650	26,25	13,12	6	1850	0,0016	Método destructivo	Tol <i>et al.</i> 1994

Fuente: Los autores

Abreviaciones:

TMA: Temperatura media anual

¹BA = 0,0776 (pD2H)0.94²BA = 0,07D2.417³BA = -16.51 + 40.26 9 *H (log10) +9.30 9 * D (log10)

BA: biomasa aérea

p: densidad de la madera

D: diámetro a la altura del pecho

H: altura del árbol

bosidad (Girardin *et al.*, 2014b). Lo que podría indicar que estas variables son importantes en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea. También cambios en la riqueza de especies maderables, que con frecuencia disminuye con el incremento de elevación, tiene potenciales implicaciones en el almacenamiento de carbono (Girardin *et al.*, 2014a).

5. Carbono almacenado en suelo

El suelo global, en los primeros tres metros, contiene aproximadamente 2.344 Gt (Gt: gigatonelada. 1 gigatonelada =

1 billón de toneladas) de carbono orgánico. Es el mayor reservorio terrestre de carbono orgánico. Del total, en el primer metro se acumula el 54% (1.500 Gt), y cerca de 615 Gt en los primeros 20 cm (Jobbágy and Jackson, 2000; Guo and Gifford, 2002). En regiones tropicales se estima que el carbono almacenado en suelo entre 0 y 1 metro de profundidad está entre 354 y 403 Gt (Batjes, 1996).

En el ecosistema de páramo, entre 0 y 40 cm de profundidad el carbono almacenado en el suelo puede variar entre 119 y 397 t/ha, bajo vegetación natural (Tabla 2). En turberas (*bofedales* o *peatland*, en inglés) a profundidad de 6 metros se

Tabla 2.
Carbono orgánico del suelo, bajo vegetación natural y bajo cultivos en trópico suramericano

Localización	Tipo de uso	Altitud (metros)	Precipitación media anual (mm)	Profundidad (cm)	Media de COS (t/ha)	Referencia
Parque Nacional Manu; Páramo (Perú)	Pasturas naturales	3348-3860	1422	20	119	Zimmermann <i>et al.</i> , 2010.
Estación biológica Guandera, Ecuador	Vegetación natural	3790-3990	1900	30	220	Tonnejck <i>et al.</i> , 2010
				82	530	
				160	870	
Apolobamba, Bolivia	Vegetación natural	3800-6040	505	0-5	210	Muñoz, 2013
				5-15	260	
Cuenca río Chimbo, Ecuador Céntral: Alto Guanujo	Cultivo anual	3387-3709	2000	5-100	707	Henry <i>et al.</i> , 2013.
	Vegetación natural	3615-3584		5-100	806	
Bosque <i>Polylepis</i> Parque Nacional natural Nor Yauyos Cochac, Perú	Vegetación natural	4200	ND	0-40	397	Vásquez <i>et al.</i> , 2014
Parque Nacional Cayambe-Coca	Turbera	3919-4880	1066-1401	0-600	1573	Hribljan <i>et al.</i> , 2016

Fuente: Los autores

Abreviación

ND: no disponible

alcanzan en promedio 1.573 t/ha (Tabla 2). Posiblemente los valores más elevados de COS bajo vegetación natural se deban a la mayor protección de la superficie del suelo propiciada por el tipo de cobertura vegetal. Por ejemplo, sitios con densas coberturas como las briofitas y especies arbustivas que aíslan el suelo de factores como precipitación e incidencia directa de radiación solar, pueden presentar mayor cantidad de carbono orgánico, porque hay menor descomposición de materia orgánica. Así mismo, la mayor densidad de raíces característica de estos vegetales puede influir en los valores altos de COS. Mientras que suelos bajo coberturas más dispersas, como pastos naturales de las familias Asteraceae, Poaceae, Pteridophyta posiblemente aporten menor cantidad de biomasa subterránea al suelo y faciliten una mayor descomposición de materia orgánica (Zimmermann, 2010, Tonnejck *et al.*, 2010).

En turberas, la alta acumulación de carbono puede deberse a dos factores: la vegetación adaptada al ambiente alpino y las condiciones de suelo saturado disminuyen la descomposición de la materia orgánica. A pesar de las bajas temperaturas del páramo, las plantas permanecen fotosintéticamente activas durante todo el año (Beck 1994). En consecuencia, la vegetación está en capacidad de proveer

materia orgánica de manera continua, lo que incrementa los contenidos de carbono (Squeo *et al.*, 2006).

De otro lado, los valores de carbono en suelos de páramo son altos comparados, por ejemplo, con oxisoles bajo vegetación natural de sabana tropical denominada Cerrado, donde se almacenan 53 t C/ha a 30 cm de profundidad (Maia *et al.*, 2010). Las bajas tasas de mineralización y de ciclaje de nutrientes en el páramo, ocasionadas por bajas temperaturas y alta humedad pueden favorecer una lenta descomposición de materia orgánica y la presencia de suelos negros y húmedos que almacenan altas tasas de carbono (Hofstede, 1999).

No obstante, la actividad antrópica en los ecosistemas andinos, cultivos y pastizales disminuye la cobertura natural y/o protección física del suelo y puede reducir significativamente los niveles de carbono orgánico en los mismos (Post & Known, 2000). Terrenos actualmente ocupados con pastos dedicados a ganadería extensiva y minifundios poseen menor contenido de COS, respecto a suelos con vegetación natural, debido a la ausencia de fertilización, combinada con altos niveles de erosión de los mismos (Dercon *et al.*, 2007).

6. Actividades agropecuarias que afectan el carbono del suelo almacenado en el páramo

En el trópico, el cambio en el uso de la tierra es responsable de 12-20% de las emisiones de gases efecto invernadero (IPCC, 2007, Van der Werf *et al.*, 2009). La conversión de coberturas naturales a sistemas agrícolas alcanza tasas de deforestación de 13 millones de ha por año (FAO, 2006). La destrucción de bosques primarios causa una rápida pérdida de carbono de la biomasa y está acompañada por pérdida de carbono del suelo (Don *et al.*, 2011). Si el suelo es usado para propósitos agrícolas, las prácticas de preparación del suelo para la siembra determinarán la cantidad de carbono secuestrado (Figura 1).



Figura 1. Uso agropecuario del suelo en el páramo de Sumapaz
Fuente: Los autores

Respecto a la actividad pecuaria en páramo, en suelos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia, (entre 0 y 30 cm de profundidad) las pasturas en uso almacenaron COS de 34,4 tC/ha; mientras que pasturas sin uso durante 20 años almacenaron 22 t/ha (Castañeda *et al.*, 2014). Una explicación a la mayor presencia de carbono en suelo de pasturas es el posible incremento de biomasa en las raíces finas que al descomponerse proporcionan mayor contenido de carbono al suelo (Andrade *et al.*, 2008; Maia *et al.*, 2009). Mientras que para las pasturas sin uso, el carbono es menor. Probablemente la falta de renovación de los pastizales disminuye la contribución de las raíces senescentes (Castañeda *et al.*, 2014). Sin embargo, este aspecto requiere mayor estudio para alcanzar conclusiones generales.

El COS es bajo en la mayoría de agrosistemas (Lal, 2004) debido a procesos de degradación del suelo (Lal, 2011) y a prácticas de manejo como deforestación, quema y labranza (Searchinger *et al.*, 2008). La erosión afecta al contenido de COS debido al rompimiento de la estructura del suelo que

facilita la liberación de CO₂. Este hecho produce la pérdida de la capacidad del suelo para garantizar el crecimiento de la planta (Van de Koppel, *et al.*, 1997).

7. Recomendaciones para gestión del carbono en páramos

En esta revisión se encontró que en el ecosistema de páramo las reservas de carbono disminuyen cuando se cambia el uso de suelo de cobertura natural a cultivos. Probablemente la eliminación de la vegetación natural que protege el suelo disminuye el ingreso de materia orgánica al suelo e incrementa la tasa de descomposición de los residuos vegetales. Por lo tanto, esta transformación suele causar una rápida pérdida de carbono de la biomasa, acompañada de pérdida de carbono del suelo (Don *et al.*, 2011).

Ante tal situación, la primera recomendación es aplicar prácticas agrícolas que reduzcan el laboreo, mantener el suelo permanentemente cubierto y realizar rotación de cultivos. Se sugiere el uso de agricultura sin labranza, en la cual las semillas son sembradas directamente en los residuos de cosecha, sin realizar arado del terreno. Con este tipo de manejo del suelo se busca disminuir la intensidad de su alteración y ayudar a evitar la erosión, pues mantiene la fertilidad y la materia orgánica del suelo (Horowitz *et al.*, 2010). Así mismo, proteger el suelo con cultivos de leguminosas, como trébol, entre periodos de cultivo, aporta orgánica fresca al suelo e incrementa los niveles de COS (Post *et al.*, 2012). Finalmente, rotar cultivos implica cambiar de especie producida, una vez se recoge una cosecha. Para este caso sería necesario identificar cuál es la combinación ideal de cultivos, tanto para disminuir pérdidas de carbono en el suelo (Yang *et al.*, 2014) como para responder a las demandas del mercado.

La segunda alternativa para mantener e incrementar el carbono almacenado en páramos es realizar programas de restauración del ecosistema de páramo. La alteración de los ecosistemas con frecuencia disminuye su capacidad de mantener la biota nativa o entregar servicios ecosistémicos (Seastedt *et al.*, 2008) como almacenamiento de carbono o regulación hídrica. En este contexto, la restauración ecológica intenta llevar el ecosistema afectado desde una condición de degradación hacia una condición totalmente funcional (Hobbs & Cramer, 2008). En consecuencia, para que el páramo recupere y mantenga el servicio de secuestro de carbono en el suelo y en la biomasa aérea se recomienda adelantar un programa de restauración. Para lograrlo, serían necesarias investigaciones previas de propagación de especies vegetales que integran diferentes estados sucesionales en este ecosistema. Una vez se reproduzcan varias

de las especies autóctonas se procederá a establecerlas en sitios donde se desarrollaron cultivos intensivos, como el de papa. Sería necesario hacer un seguimiento y una evaluación quinquenal para determinar la respuesta del sitio degradado ante el restablecimiento de las especies nativas. Según el resultado obtenido, será necesario definir nuevas estrategias para continuar con el proceso de recuperación del ecosistema.

Cualquiera de estas dos opciones tiene probabilidad de alcanzarse, siempre y cuando se superen barreras económicas, institucionales, educativas y sociales (Eglin *et al.*, 2010). Se requiere un programa de gobierno a un plazo de por lo menos diez años, que informe y asesore técnicamente al agricultor sobre los beneficios y métodos para trabajar el suelo con agricultura de conservación y en procesos de restauración de ecosistemas. El mismo programa debe incorporar una financiación para respaldar los costos por incremento de mano de obra al proceso productivo, debido a que se reemplaza el uso de maquinaria por obreros cualificados. Por otro lado, la rotación de cultivos es factible cuando las instituciones del Estado garantizan al agricultor un mercado para sus variados productos con volúmenes y precios que le permitan recuperar la inversión y obtener excedentes. En síntesis, las perspectivas del suelo como reservorio de carbono pueden ser alentadoras, en la medida en que los estados fomenten técnica y económicamente estrategias de conservación de suelos. Al mismo tiempo, los gobiernos deben apoyar el mercadeo de carbono de productos agropecuarios de pequeños y medianos productores, para que el agricultor tenga la posibilidad de aplicar prácticas agrícolas que disminuyan la pérdida de carbono del suelo.

8. Líneas futuras de investigación

Los ecosistemas de alta montaña mantienen servicios ecosistémicos que benefician a las poblaciones humanas. Por ejemplo, el ecosistema de páramo andino almacena carbono orgánico en el suelo, también abastece y regula el agua. Estas funciones ecológicas mancomunadas propician la irrigación de cultivos, procesos industriales, generación de energía y agua para consumo doméstico de centros urbanos de Colombia, Venezuela, Perú y Ecuador (Buytaert *et al.*, 2006). En Colombia se han identificado 48 páramos en la cordillera de los Andes (Montes, 2001). Sin estos ecosistemas, la supervivencia de millones de habitantes estará en riesgo. Sin embargo, este ecosistema se está degradando debido a la influencia de factores antrópicos. La intensificación agrícola, la explotación minera, la urbanización y el cambio climático (Buytaert *et al.*, 2006; Marquis *et al.*, 2012). La alteración del suelo por cambio de uso trae serias consecuencias socioeconómicas, incluyendo la desertificación, incremento de

la pobreza y de conflictos (Ariza *et al.*, 2013; Korner *et al.*, 2005). Esta transformación tiene impacto significativo sobre el carbono secuestrado. Así que cuantificar carbono en páramos colombianos puede contribuir a definir prioridades de manejo de recursos naturales en este ecosistema y a soportar proyectos que incentiven la mitigación de carbono en ecosistemas de alta montaña.

Futuros estudios pueden evaluar factores que controlan la distribución regional y vertical del COS. Por ejemplo, identificar y analizar posibles relaciones entre el COS, su distribución vertical y factores ambientales y pedológicos en diversos páramos del país. Se propone analizar el contenido de COS entre 0-100 cm de profundidad, en relación con factores abióticos (clima, tipos de material parental, pendiente); factores bióticos (cantidad de carbono en raíces y hojarasca) y características pedológicas (tipo de suelo y sus propiedades, textura y pH). Con esta información es factible modelar y predecir la distribución vertical de COS bajo diferentes tipos de suelo y para los ecosistemas de páramo colombianos.

Un segundo estudio puede responder a las incertidumbres que se tienen sobre el almacenamiento de carbono por turberas. Se sabe que las turberas almacenan la mayor cantidad de carbono en su biomasa subterránea y su dinámica tiene importantes implicaciones para el ciclo global del carbono (Yu, 2012). Estimaciones de reservas de carbono se disponen para regiones como Norteamérica, Finlandia y Rusia (Botch *et al.*, 1995; Turunen *et al.*, 2002; Bridgham *et al.*, 2006). Sin embargo, para ecosistemas de páramo son escasos y se puede convertir en un campo de investigación. Para estimar carbono en las turberas se tienen tres aproximaciones: volumen de turba, densidad del carbono y comportamiento en el tiempo. El volumen de turba busca conocer la profundidad media de la turbera, la densidad aparente y la concentración de carbono para finalmente estimar el carbono en el suelo (Gorham, 1991).

La aproximación de densidad de carbono requiere datos similares pero se enfoca en la estimación del contenido total de carbono por unidad de área, conocido como densidad de carbono del suelo. Luego deriva la existencia total de carbono multiplicando el área de la turbera por la densidad del carbono (Armentano & Menges, 1986). La aproximación de tiempo utiliza múltiples edades de turberas individuales. Analiza tasas de acumulación y la variación del área de la turbera con el fin de estimar cambios en el tiempo de las reservas de carbono (Yu *et al.*, 2010). Así mismo, es importante entender los procesos de la turbera y establecer relaciones empíricas entre sus propiedades (área, profundidad y edad) para generar estimaciones más robustas de las existencias de carbono (Yu, 2012).

Conclusiones

La literatura disponible en bases de datos indica que en el páramo el suelo es el componente que almacena mayor cantidad de carbono, respecto a la biomasa aérea. A profundidades entre 0 y 40 cm, bajo vegetación natural se almacenan entre 119 y 397 t/ha. Estas diferencias pueden deberse tanto a la densidad de la cobertura natural como a la cantidad de raíces por unidad de área.

Las actividades agrícolas disminuyen el contenido de carbono almacenado en el páramo. Por un lado, la eliminación de la vegetación nativa reduce el ingreso de materia orgánica al suelo e incrementa la tasa de descomposición de residuos vegetales. Por otro, la labranza propicia desintegración y emisión de carbono almacenado en el suelo. También la adición de enmiendas como cal agrícola y dolomita liberan CO₂ a la atmósfera, por lo cual, prácticas como reducción de laboreo, mantener entre periodos de cultivo el suelo cubierto con leguminosas y rotar los cultivos ayuda a retener el carbono almacenado en el suelo.

En general, los estudios de carbono en páramo son escasos, a pesar de su gran importancia en la dinámica del carbono del planeta. Sería interesante explorar la distribución vertical de carbono en la profundidad, así como realizar estimaciones de carbono en las turberas para abrir posibilidades de que este ecosistema se tenga en cuenta en los programas de reducción de emisiones de gases efecto invernadero asociadas a deforestación y degradación forestal. ≡

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD– por la financiación de la investigación que originó este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ÁLVAREZ, E., DUQUE, A., SALDARRIAGA, J., CABRERA, K., DE LAS SALAS, G., DEL VALLE I., LEMA, A., MORENO, F., ORREGO, S. & RODRÍGUEZ, L. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forest of Colombia. *In: Forest Ecology and Management*. 2012. 267: 297-308
2. ANDRADE, H., R. BROOK & M. IBRAHIM. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *In: Plant and Soil*, 2008, 1(1-2): 11-22.
3. ARIZA, C., MASELLI, D., & KOHLER, T. Mountains: Our life, our future. Progress and perspectives on sustainable mountain development from Rio 1992 to Rio 2012 and beyond. SDC and CDE, Bern, Switzerland. 2013.
4. ARMENTANO, T.V. & MENGES, E. S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *In: The Journal of Ecology*, 1986, 755-774.
5. BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *In: Eur. J. Soil Sci.* 1996 47, 151–163.
6. BECK E. Cold tolerance in tropical alpine plants. Tropical alpine environments. Plant form and function. 1994. Cambridge University Press, Cambridge, pp 77–110
7. BOTCH, M. S., KOBAK, K. I., VINSON, T. S. & KOLCHUGINA, T. P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union. 1995. *In: Global Biogeochemical Cycles*, 9(1), 37-46.
8. BRIDGHAM, S. D., MEGONIGAL, J. P., KELLER, J. K., BLISS, N. B. & TRETTIN, C. The carbon balance of North American wetlands. *In: Wetlands*. 2006, 26, 889–916
9. BUYTAERT, W., CÉLLERI, R., DE BIÈVRE, B., CISNEROS, F., WYSEURE, G., DECKERS, J. & HOFSTEDTE, R. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *In: Earth-Science Reviews*, 2006, 79(1), 53-72.
10. CASTAÑEDA, H. J. A. Impact of grazing on soil organic carbon in high lands in Anaimé, Tolima, Colombia. *In: Zootecnia tropical*. 2014, 32(1).
11. CHATTERJEE, A., LAL, R., WIELOPOLSKI, L., MARTIN, M. Z., & EBINGER, M. H. Evaluation of different soil carbon determination methods. *Critical Reviews In: Plant Science*. 2009, 28(3), 164-178.
12. CHAVE, J., ANDALO, C., BROWN, S., CAIRNS, M. A., CHAMBERS, J. Q., EAMUS, D., ... & LESCURE, J. P. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *In: Oecologia*. 2005, 145(1), 87-99.
13. DERCON, G., GOVERS, G., POESEN, J., ROMBAUT, K., VANDENBROECK, E., SÁNCHEZ, H., LOAIZA, G., & DECKERS, J., Animal-powered tillage erosion assessment in the Southern Andes region of Ecuador. *In: Geomorphology*, 2007, 87, 4–15
14. DINERSTEIN, E., OLSON, D. M., GRAHAM, D. H., WEBSTER, A. L., PRIMM, S. A., BOOKBINDER, M. P., & LEDEC, G. A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean. World Wildlife Fund and World Bank, Washington DC, USA. FAO (2006) *In: FAO Forestry Paper*. 1995, Vol. 147, pp. 350. FAO, Rome.
15. DON, A., SCHUMACHER, J., & FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *In: Global Change Biology*. 2011, 17 (4), 1658-1670.
16. EGLIN, T., CIAIS, P., PIAO, S. L., BARRE, P., BELLASSEN, V., CADULE, P. & SMITH, P. Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes. *In: Tellus B*, 2010, 62(5), 700-718.
17. FEHSE, J., HOFSTEDTE, R., AGUIRRE, N., PALADINES, C., KOOIJMAN, A., & SEVINK, J. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink?. *In: Forest Ecology and Management*. 2002, 163(1), 9-25.
18. FELDPAUSCH, T. R., LLOYD, J., LEWIS, S. L., BRIENEN, R. J., GLOOR, M., MONTEAGUDO MENDOZA, A. & ALEXIADIS, M. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *In: Biogeosciences*. 2012, 3381-3403.
19. FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION (2006). Global forest resources assessment 2005; progress towards sustainable forest management. Rome, Italy: FAO

20. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. (FAO). 2010. Global forest resources assessment 2010. For. pap. 163, FAO, Rome
21. FISHER, J. B., MALHI, Y., TORRES, I. C., METCALFE, D. B., VAN DE WEG, M. J., MEIR, P., SILVA-ESPECJO, & HUASCO, W. H. Nutrient limitation in rainforests and cloud forests along a 3000m elevation gradient in the Peruvian Andes. *In: Oecologia*. 2013, 172, 889–902,
22. GENTRY, A. H. Tropical forest biodiversity: distribution patterns and their conservation significance. *In: Oikos*. 1992, 63, 19–28
23. GIRARDIN, C. A. J., MALHI, Y., ARAGÃO, L. E. O. C., MAMANI, M., HUARACA HUASCO, W., DURAND, L., FEELEYS, K. J., RAPP, J., SILVA-ESPEJO, J. E., SILMAN, M., SALINAS, N., & WHITTAKER, R. J. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *In: Glob. Change Biol.* 2010 16, 3176–3192.
24. GIRARDIN, C. A., FARFAN-RIOS, W., GARCIA, K., FEELEY, K. J., JØRGENSEN, P. M., MURAKAMI, A. A. & MALDONADO, C. Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network of six Andean elevation transects. *In: Plant Ecology & Diversity*. 2014a, 7(1-2), 161-171.
25. GIRARDIN, C. A. J., ESPEJOB, J. E. S., DOUGHTY, C. E., HUASCO, W. H., METCALFE, D. B., DURAND-BACA, L., MARTHEWS, T. R., ARAGAO, L. E. O. C., FARFAN-RIOS, W., GARCÍA-CABRERA, K., HALLADAY, K., FISHER, J. B., GALIANO-CABRERA, D. F., HUARACA-QUIPE, L. P., ALZAMORA-TAYPE, I., EGUILUZ-MORA, L., SALINAS-REVILLA, N., SILMAN, M. R., MEIR, P., & MALHI, Y. Productivity and carbon allocation in a tropical montane cloud forest of the Peruvian Andes. *In: Plant Ecology & Diversity* 2014. vol 7, 107–123 [Http://dx.doi.org/10.1080/17550874.2013.820222](http://dx.doi.org/10.1080/17550874.2013.820222)
26. GOETZ, S. J., & DUBAYAH, R. O. Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. *In: Carbon Management*. 2011, 2(3), 231–244
27. GORHAM, E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *In: Ecological applications*. 1991, 1(2), 182-195.
28. GUO, L. B., & GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *In: Global change biology*. 2002, 8 (4), 345-360.
29. HALL, F. G., BERGEN, K., BLAIR, J. B., DUBAYAH, R., HOUGHTON, R., HURTT, G. & SHUGART, H. H. Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *In: Remote Sensing of Environment*. 2011, 115(11), 2753-2775.
30. HEDBERG, O. Afroalpine plant ecology. *Almqvist & Wiksell*. 1964.
31. HEDBERG, O. Afroalpine vegetation compared to paramo: convergent adaptations and divergent differentiation. *In: Balslev, H., Luteyn, J.L. (Eds.), Paramo: An Andean Ecosystem under Human Influence*. *In: London: Academic Press*. 1992. pp. 15– 29.
32. HENRY, A., MABIT, L., JARAMILLO, R. E., CARTAGENA, Y. & LYNCH, J. P. Land use effects on erosion and carbon storage of the Rio Chimbo watershed, Ecuador. *In: Plant and soil*, 2013. 367 (1-2), 477-491
33. HEROLD, M., & SKUTSCH, M. Monitoring, reporting and verification for national REDD + programmes: Two proposals. *In: Environmental Research Letters*. 2011, 6, 014002.
34. HOBBS, R. J., & CRAMER, V. A. Restoration ecology: interventionist approaches for restoring and maintaining ecosystem function in the face of rapid environmental change. *In: Annual Review of Environment and Resources*. 2008, 33, 39-61.
35. HOFSTEDTE, R. G. The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian paramo grasslands. *In: Plant and Soil*. 1995, 173(1), 111-132.
36. HOFSTEDTE, F. T., STEENKAMP, J. B. E., & WEDEL, M. International market segmentation based on consumer-product relations. *In: Journal of Marketing Research*. 1999, 1-17.
37. HOFSTEDTE, R. & MENA, P. Los beneficios escondidos del páramo: servicios ecológicos e impacto humano. *In: Ecociencia Foundation; Mountain Institute; University of Amsterdam: Quito*. 2003
38. HOROWITZ, J., EBEL, R., & UEDA, K. "No-till" farming is a growing practice. Washington, DC: USDA Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/eib-economic-information-bulletin/eib70.aspx. 2010
39. HOUGHTON, R. A. Balancing the global carbon budget. *In: Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2007, 35, 313-347.
40. HRIBLIJAN, J. A., SUÁREZ, E., HECKMAN, K. A., LILLESKOV, E. A., & CHIMNER, R. A. Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *In: Wetlands ecology and management*, 2016. 24(2), 113-127.
41. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry. University Press, Cambridge. 2007.
42. JOBBÁGY, E. G. & JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *In: Ecol. Appl.* 2000, 10, 423–436.
43. KLINGE, H., RODRIGUES, W. A., BRUNIG, E., & FITTKAU, E. J. Biomass and structure in a central Amazonian rain forest. *In: Golley F.B., Medina E. (eds) Tropical Ecological Systems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, vol 11. Springer, Berlin, Heidelberg 1975. p. 115-122
44. KÖRNER, C., OHSAWA, M., SPEHN, E., BERGE, E. BUGMANN, H., GROOMBRIDGE, B., & YOSHINO, A. Mountain systems. *In: Hassan, R., Scholes, R. & Ash, N. (Eds.), Ecosystem and human wellbeing: Current state and trends*. Washington: Island Press. 2005 681-716
45. LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *In: Geoderma*. 2004. 123, 1-22.
46. LAL, R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *In: Food Policy*. 2011. 36, S33-S39.
47. LU, DENGSHENG. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *In: International Journal of Remote Sensing*. 2005, 26. 12 2509-2525.
48. LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *In: International journal of remote sensing*. 2006. 27(7), 1297-1328.
49. LUTEYN, J. L., & CHURCHILL, S. P. Paramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature. New York: New York Botanical Garden Press, 1999
50. MAIA, S. M., OGLE, S. M., CERRI, C. C., & CERRI, C. E. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *In: Soil and Tillage Research*. 2010, 106 (2), 177-184.
51. MARQUIS, G., BALDASSARRI, T., HOFER, T., ROMEO, R., & WOLTER, P. FAO's Current Engagement in Sustainable Mountain Development. *In: Mountain Research and Development*. 2012, 32 (2), 226-230
52. MARTÍNEZ, M. L., PÉREZ-MAQUEO, O., VÁZQUEZ, G., CASTILLO-CAMPOS, G., GARCÍA-FRANCO, J., MEHLTRETER, K., EQUIHUA, M., & LANDGRAVE, R. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *In: Forest Ecol. Manag.* 2009. 258, 1856–1863.
53. MUÑOZ, M. A., FAZ, A., & ZORNOZA, R. Carbon stocks and dynamics in grazing highlands from the Andean Plateau. *In: Catena*, 2013. 104, 136-143.

54. NANZYO, M., SHOJI, S. & DAHLGREN, R. Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. *Developments in Soil Science*. In: Elsevier, Amsterdam. 1993. vol. 21, p145-187
55. NELSON, B. W., MESQUITA, R., PEREIRA, J. L., DE SOUZA, S. G. A., BATISTA, G. T., & COUTO, L. B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *In: Forest ecology and management*. 1999, 117(1), 149-167.
56. PEDRAZA-PEÑALOSA P., BETANCUR J. & FRANCO-ROSSELLI P. Chisacá: Un recorrido por los páramos andinos. Segunda edición. Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2005. 340 p.
57. POST, W. M., & KWON, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *In: Global change biology*, 2000. 6 (3), 317-327.
58. POST, W. M., IZAURRALDE, R. C., WEST, T. O., LIEBIG, M. A., & KING, A. W. Management opportunities for enhancing terrestrial carbon dioxide sinks. *In: Frontiers in Ecology and the Environment*. 2012, 10(10), 554-561
59. ROMÁN-CUESTA, R. M., SALINAS, N., ASBJORNSEN, H., OLIVERAS, I., HUAMAN, V., GUTIÉRREZ, Y. & ASTETE, R. Implications of fires on carbon budgets in Andean cloud montane forest: The importance of peat soils and tree resprouting. *In: Forest Ecology and Management*. 2011. 261(11), 1987-1997.
60. SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., & YU, T. H. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *In: Science*. 2008, 319 (5867), 1238-1240.
61. SEASTEDT, T. R., HOBBS, R. J., & SUDING, K. N. Management of novel ecosystems: are novel approaches required? *In: Frontiers in Ecology and the Environment*. 2008, 6(10), 547-553.
62. SLIK, J. W. F., AIBA, S. I., BREARLEY, F. Q., CANNON, C. H., FORSHED, O., KITAYAMA, K., & POULSEN, A. D. Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests. *In: Global Ecology and Biogeography*. 2010. 19(1), 50-60.
63. STOLBOVOY V, MONTANARELLA L, FILIPPI N, JONES A, GALLEGO J, GRASSI G. Soil Sampling Protocol to Certify the Changes of Organic Carbon Stock in Mineral Soil of the European Union. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007.
64. SPRACKLEN, D. V. & RIGHELATO, R. Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *In: Biogeosciences*, 2014, 11(10), 2741-2754.
65. SQUEO FA, WARNER BG, ARAVENA R, ESPINOZA D. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *In: Rev Chil Hist Nat*. 2006, 79:245-255
66. SUNDQUIST E.T. & VISSER K. The geological history of the carbon cycle. In *Biogeochemistry*, ed. W.H.Schlesinger, 2004. Vol. 8, Treatise on Geochemistry, ed. H.D Holland, K.K Turekian, pp. 425-72. Oxford, UK: Elsevier-Pergamon
67. TABATABAI, M. A., & BREMNER, J. M. Automated instruments for determination of total carbon, nitrogen, and sulfur in soils by combustion techniques. *In: Soil Analysis*, 1991, pp. 261-286. Smith, K. A. Ed., Marcel Dekker, New York
68. TOL, G. J., & CLEEF, A. M. Above-ground biomass structure of a *Chusquea tessellata* bamboo páramo, Chingaza National Park, cordillera oriental, Colombia. *In: Plant Ecology*, 1994. 115(1), 29-39.
69. TONNEIJCK, F. H., JANSEN, B., NIEROP, K. G. J., VERSTRATEN, J. M., SEVINK, J. & DE LANGE, L. Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *In: European Journal of Soil Science*. 2010, 61, 392-405.
70. TURUNEN, J., TOMPPO, E., TOLONEN, K., & REINIKAINEN, A. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland-application to boreal and subarctic regions. *In: Holocene*. 2002, 12, 69-80
71. van der HAMMEN, T., & HOOGHMESTRA, H. Neogene and Quaternary history of vegetation, climate, and plant diversity in Amazonia. *In: Quaternary Science Reviews*. 2000, 19 (8), 725-742.
72. VAN DE KOPPEL, J., RIETKERK, M. & WEISSING, F. L. Catastrophic vegetation shift and soil degradation in terrestrial grazing system. *In: Trends in Ecology & Evolution*. 1997, 12, 352-356.
73. van der WERF G. R., MORTON DC. & DE FRIES R. S. CO₂ emissions from forest loss. *In: Nature Geoscience*. 2009, 2, 737-738.
74. VÁSQUEZ, E., LADD, B., & BORCHARD, N. Carbon storage in a high-altitude *Polylepis* woodland in the Peruvian Andes. *In: Alpine botany*, 2014, 124(1), 71-75.
75. VUILLE, M., BRADLEY, R. S., & KEIMIG, F. T. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *In: Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2000 105 (10), 12447-12460
76. WADA K. Mineral characteristics of Andisols. In *Soils with variable Charge*. Ed. B. K. G. Theng, pp. 87-107. Offset Publishers, Palmerston North, New Zealand. 1980.
77. WAGAI, R., KAJIURA, M., ASANO, M., & HIRADATE, S. Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different?. *In: Geoderma*. 2015 241, 295-305
78. WARD, A., DARGUSCH, P., GRUSSU, G. & ROMEO, R. Using carbon finance to support climate policy objectives in high mountain ecosystems. *In: Climate Policy*. 2015 1-20.
79. YANG, X., GAO, W., ZHANG, M., CHEN, Y. & SUI, P. 2014. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain. *In: Journal of Cleaner Production*. 2014, 76, 131-139
80. YU, Z. C., LOISEL, J., BROUSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. & HUNT, S. J. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *In: Geophys. Res. Lett.* 2010, 37, L13402.
81. YU, Z. C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review. *In: Biogeosciences*. 2012. 9(10), 4071-4085.
82. ZEHETNER, F., MILLER, W. P. & WEST, L. T. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *In: Soil Science Society of America Journal*. 2003. 67, 1797-1809.
83. ZEHETNER, F., & MILLER, W. P. Soil variations along a climatic gradient in an Andean agro-ecosystem. *In: Geoderma*, 2006 137 (1), 126-134.
84. ZIMMERMANN, M., MEIR, P., SILMAN, M. R., FEDDERS, A., GIBBON, A., MALHI, Y. & ZAMORA, F. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *In: Ecosystems*. 2010, 13 (1), 62-74.