

Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia ¹

Fernández Pérez, Carlos Julio; Cely Reyes, Germán Eduardo; Serrano, Pablo Antonio

Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia ¹

Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, vol. 28, núm. 1, 2019

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281857987009>

DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Artículos

Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia

1

Quantification of Carbon Sequestration and Analysis of Soil Properties in Natural Coverages and a Pine Plantation in the Páramo of Rabanal, Colombia

Quantificação da captura de carbono e análise das propriedades do solo em coberturas naturais e uma plantação de pinus, no Páramo de Rabanal, Colômbia

Carlos Julio Fernández Pérez ² carlos.fp91@gmail.com
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia

 <http://orcid.org/0000-0001-5606-1847>

Germán Eduardo Cely Reyes ³ german.cely@uptc.edu.co
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia

 <http://orcid.org/0000-0001-6312-3575>

Pablo Antonio Serrano ⁴ pablo.serrano@uptc.edu.co
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia

 <http://orcid.org/0000-0002-1270-3024>

Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, vol. 28, núm. 1, 2019

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Recepción: 29 Julio 2017
Revisado: 15 Agosto 2017
Aprobación: 31 Agosto 2018

DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281857987009>

Resumen: Con muestreo puntual sistemático en malla rígida de 48 puntos (350 m entre puntos) aplicado en dos estratos de suelo (profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm) se determinó el contenido de carbono orgánico del suelo y el efecto sobre las siguientes propiedades del suelo: densidad aparente; humedad gravimétrica; pH; materia orgánica y porcentaje de carbono. La zona de estudio alcanza 500 hectáreas, contiene una plantación de pino y vegetación nativa del Páramo de Rabanal en Boyacá, Colombia. El carbono orgánico promedio del suelo encontrado a 0-15 y 0-30 cm de profundidad fue de 51,4 t/ha y 108 t/ha respectivamente. Se registraron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre la cobertura nativa y la plantación de pino en las dos profundidades para las variables densidad aparente, humedad gravimétrica y pH, mientras que las variables materia orgánica y porcentaje de carbono no mostraron diferencias significativas. Los resultados muestran una reducción en la capacidad hídrica de los suelos del área de estudio debida al aumento de la densidad aparente en los suelos ubicados bajo las plantaciones de pino. Con respecto a los contenidos de carbono, se evidencia una disminución comparada frente a la cobertura de vegetación de páramo, ya que las condiciones propias de la plantación forestal limitan el crecimiento de los diferentes estratos vegetales endémicos de este ecosistema y, de esta manera, la actividad biológica.

Palabras clave: cambios en el suelo, captura de carbono, carbono orgánico, Páramo de Rabanal, suelos, pino.

Abstract: Soil organic carbon and its effect on five soil properties (apparent density; gravimetric moisture; pH; organic matter; and percentage of carbon) was determined by implementing a systematic point sampling method using a 48 point fixed grid (350

m between each point) applied in two soil layers (at depths of 0-15 and 15-30 cm). The 500-hectare study zone hosts a pine plantation and native vegetation of the Páramo of Rabanal in Boyacá, Colombia. The average soil organic carbon found at depths of 0-15 and 0-30 cm was 51.4 t/ha and 108 t/ha, respectively. Statistical differences ($P < 0.05$) were found between the native coverage and the pine plantation at both depths for the apparent density, gravimetric moisture and pH variables, while the organic matter and percentage of carbon variables showed no significant differences. The results show a reduction in the water capacity of the soils in the study area due to the increase in apparent density in soils located under the pine plantation. With respect to carbon contents, there is a comparative decrease in relation to the high-plateau (Páramo) vegetation coverage, given that the characteristic conditions of forest plantations limit the growth of the different vegetal layers endemic to that ecosystem, and consequently, biological activity.

Keywords: changes in soil, carbon sequestration, organic carbon, Páramo of Rabanal, soils, pine.

Resumo: Com amostragem pontual sistemática em malha rígida de 48 pontos (350 m entre pontos) aplicada em duas camadas de solo (profundidades de 0-15 e 15-30 cm) determinou-se o conteúdo de carbono orgânico do solo e o efeito sobre as seguintes propriedades do solo: densidade aparente; umidade gravimétrica; pH; matéria orgânica e porcentagem de carbono. A área de estudo chega a 500 hectares, contém uma plantação de pinus e vegetação nativa do Páramo de Rabanal em Boyacá, Colômbia. O carbono orgânico médio do solo encontrado a 0-15 e 0-30 cm de profundidade foi de 51,4 t/ha e 108 t/ha, respectivamente. Registraram-se diferenças estatísticas ($P < 0,05$) entre a cobertura nativa e a plantação de pinus, nas duas profundidades, para as variáveis densidade aparente, umidade gravimétrica e pH, enquanto as variáveis matéria orgânica e porcentagem de carbono não apresentaram diferenças significativas. Os resultados mostram uma redução na capacidade hídrica dos solos da área de estudo devido ao aumento da densidade aparente nos solos localizados sob as plantações de pinus. Com respeito aos conteúdos de carbono, evidenciou-se uma diminuição em comparação à cobertura de vegetação de páramo, já que as condições particulares da plantação florestal limitam o crescimento das diferentes espécies vegetais endêmicas desse ecossistema e, assim, a atividade biológica.

Palavras-chave: mudanças no solo, captura de carbono, carbono orgânico, Páramo de Rabanal, solos, pinus.

Introducción

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Fernández Pérez, Carlos Julio, Germán Eduardo Cely Reyes, y Pablo Antonio Serrano. 2019. “Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el Páramo de Rabanal, Colombia.” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 28 (1): 121-133. doi: 10.15446/rcdg.v28n1.66152.

Colombia posee la mitad de la superficie de los ecosistemas de páramo en el mundo, estos se “localizan en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, ocupando el 1,3% de la extensión continental del país, alcanzando su mayor extensión en el departamento de Boyacá” (Morales-Betancourt y Estévez-Varón 2006, 40). Este ecosistema, ubicado generalmente por encima de la cota de los 3.000 metros de altitud, posee unas condiciones físico-bióticas que lo convierten en fuente permanente del líquido esencial para la vida: el agua (Morales et ál. 2007). Además, su capacidad de almacenamiento y captación de carbono atmosférico, a través de la retención de materia orgánica en

sus suelos y la absorción de dicho elemento por las masas boscosas en crecimiento, hacen del páramo un ecosistema estratégico de amplia importancia nacional e internacional (Buytaert, Cuesta-Camacho y Tobón 2010; Cargua et ál. 2014; Hofstede, Segarra y Mena 2003). Este hecho ha impulsado a la comunidad científica a avanzar hacia la comprensión y delimitación de los páramos de tal manera, que se puedan dar pautas para plantear políticas hacia su conservación y uso sostenible.

El departamento Boyacá es privilegiado por contar con este tipo de ecosistema rico en flora y fauna. De los 123 municipios de Boyacá, el 59% contiene áreas de páramo (Corpopoyacá 2008). Estos ecosistemas, importantes por su función natural como reguladores hídricos, donde sus suelos juegan un papel fundamental, son sistemas frágiles y pueden sufrir degradación con los cambios en el uso del suelo (Buytaert et ál. 2005; Morales et ál. 2007). Su gran capacidad de retención hídrica obedece a características físicas de los suelos, como baja densidad aparente, alta porosidad y condiciones de consistencia muy friable (Daza Torres, Hernández Flórez y Triana 2014). Así mismo, las condiciones de humedad del suelo son dinámicas y dependen también del clima (páramo seco o páramo húmedo), vegetación, profundidad del suelo y demás características físicas del perfil y algunas químicas, como la materia orgánica, determinante en la capacidad de retención de agua (Quichimbo et ál. 2015). Los suelos paramunos por lo general son orgánicos y tienen limitantes para su uso en actividades que sometan al suelo a cargas o presiones fuertes y constantes, como las ocasionadas por el pisoteo continuo del ganado o el paso de maquinaria. No obstante, las actividades agrícolas, forestales, ganaderas y mineras están alterando las propiedades del ecosistema y afectando la biodiversidad y las funciones ecológicas que cumple el páramo (Balthazar et ál. 2015).

El páramo de Rabanal, ubicado cerca de Tunja, capital del departamento de Boyacá, cumple la importante función de proveer agua a cerca de 300.000 personas en Tunja y poblaciones aledañas. El páramo de Rabanal está amenazado principalmente por los largos procesos de intervención humana que, desde épocas precolombinas, han transformado su paisaje en un complejo mosaico socioecológico. Variadas coberturas vegetales y numerosas formas de uso del suelo ponen en evidencia las distintas condiciones biofísicas y la diversidad de sistemas productivos desplegados por los habitantes, las empresas privadas y las instituciones públicas que han confluído allí a lo largo del tiempo. Además, en este complejo paramuno se han entregado diecisiete títulos de minería que abarcan un área de 8.395 ha (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia [MAVDT] 2009, citado por Güiza Suárez 2011).

A su vez, la industria del coque, estrechamente asociada a la minería, genera impactos importantes en términos de afectación de caudales por excesivo consumo de agua para el apagado de hornos y contaminación del aire por uso de tecnologías deficientes en los hornos de coquización. Adicionalmente, Rabanal cuenta con una plantación forestal de coníferas de aproximadamente 1.031,59 ha (IAvH, CAR,

Corpoboyacá y Corpochivor 2008; Güiza 2011); en zonas donde se explota madera intensivamente, se producen fuertes cambios en las propiedades químicas de los suelos, porque el crecimiento de las plantas, que implica la extracción de nutrientes, altera las propiedades químicas de estos, debido a la pérdida masiva de elementos y la acidificación del medio por la hojarasca del eucalipto y del pino principalmente. De igual modo, las propiedades hidrofísicas también son alteradas por la elevada evapotranspiración, el impacto del tronco al ser talado y el transporte, que genera compactación de los suelos (Gayoso Aguilar e Iroume Arrau 1995).

La captura del carbono orgánico del suelo —en adelante, COS— ha sido estudiada en diversos escenarios, con el fin de evaluar la capacidad de almacenamiento de dicho elemento que poseen los diferentes ecosistemas en los suelos y, de este modo, cuantificar las capturas de CO₂ que, de acuerdo con el ciclo global de carbono, puede capturar el suelo (Stockmann et ál. 2013). En ecosistemas de alta montaña, dentro de los cuales se encuentran los páramos, los grandes reservorios de COS son resultado de la alta productividad primaria neta, así como de las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica debido a las bajas temperaturas (Zimmermann et ál. 2010). De esta manera, el ecosistema de páramo se convierte en un importante escenario de mitigación del efecto del cambio climático, principalmente, por la captura y almacenamiento de carbono edáfico.

Un análisis de los principales componentes de los suelos paramunos en el sur de Ecuador, realizado por Quichimbo et ál. (2015), indicó que sus propiedades hidrofísicas tienen gran variabilidad por el efecto del cambio de cobertura en los horizontes superficiales. La baja densidad de estos suelos, con alta porosidad y elevada materia orgánica, hace que tengan una gran capacidad de retención de agua. Sin embargo, diversos autores reportan amplias intervenciones antrópicas, principalmente por actividades forestales, de agricultura y ganadería que alteran en forma negativa las propiedades edáficas de estos ecosistemas, con aumentos en las densidades, compactación, disminución de la capacidad hídrica, menor carbono orgánico y, en consecuencia, menor materia orgánica (Estupiñán et ál. 2009; Quichimbo et ál. 2015).

Debido a lo anterior, esta investigación plantea como objetivo principal cuantificar y analizar en dos profundidades las variables carbono orgánico del suelo (COS), carbono equivalente —en adelante, COe—, densidad aparente —en adelante, Da—, humedad gravimétrica —en adelante, HG—, pH, materia orgánica —en adelante, MO— y porcentaje de carbono orgánico (%CO), bajo coberturas naturales de páramo y una plantación forestal de coníferas, en el páramo de Rabanal. Esta investigación busca contribuir a la comprensión de las relaciones del comportamiento del suelo ante dichas propiedades físico-químicas dentro de estos ecosistemas y, de alguna manera, entender mejor la dinámica del páramo, con el fin de dar pautas para la adecuada gestión de estos ecosistemas estratégicos.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El complejo de páramos de Rabanal y el río Bogotá se ubica en el denominado altiplano cundiboyacense, entre los municipios de Samacá y Ventaquemada en Boyacá, y Villapinzón, Guachetá y Lenguazaque en Cundinamarca. El área de estudio se localizó en el municipio de Samacá, entre las veredas La Chorrera y Salamanca. La ubicación de los puntos está entre las coordenadas 5°25'20,8" N - 73°32'32,1" W; 05°25'20,9" N - 73°33'34,4" W; 05°26'23,3" N - 73°32'32,1" W; 05°26'22,0" N - 73°33'35,3" W (figura 1). Esta una zona de páramo se ubica cerca de las represas de Gachaneca y Tiatinos.

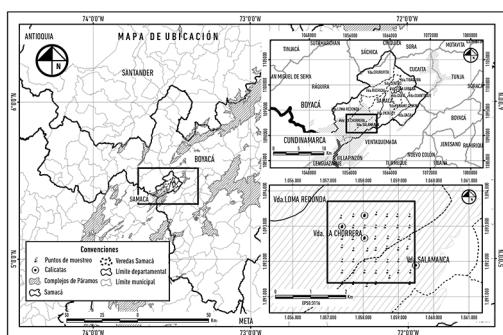


Figura 1.

Mapa ubicación geográfica y unidades de muestreo en el área de estudio. Datos: los límites de departamentos, municipios y veredas fueron obtenidos de la base de datos del IGAC.

Nota: la malla de puntos fue diseñada por medio de un software SIG (ArcGIS).

En la figura 2 se encuentra la clasificación de las coberturas vegetales a través de la metodología Corine Land Cover, determinada según los registros y fotos en campo. En el territorio domina el herbazal densos de tierra firme con arbustos en 271,56 ha, seguido de la plantación de coníferas (pino) en 143,45 ha. El herbazal denso inundable y la vegetación secundaria alcanzan 60,7 ha, los afloramientos rocosos y embalses ocupan 24,2 ha.

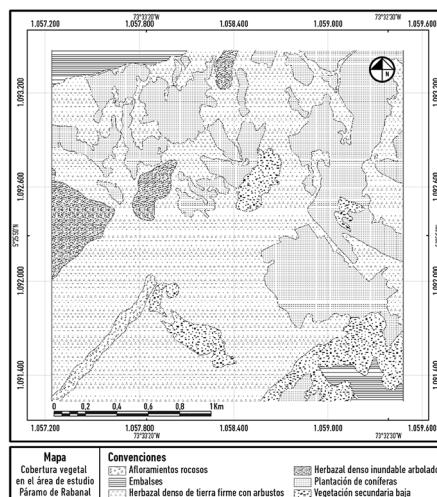


Figura 2.

Mapa coberturas vegetales (Corine Land Cover) en el área de estudio.

Datos: se usó una imagen satelital Landsat 8 como apoyo para la digitalización de las coberturas vegetales en el área de estudio; la categorización se realizó con base en el muestreo en campo.

Estudio de campo

Con ayuda de un sistema de posicionamiento global (GPS), se llegó a los 48 puntos de muestreo puntual sistemático establecidos previamente en forma de malla, con una equidistancia entre puntos de 350 m, para un total de 500 ha. En campo se realizó una cajuela de muestreo de 30 cm, donde se extrajeron las muestra de 0-15 cm y de 15-30 cm, por medio de un cilindro con un diámetro de 5,4 cm y una altura de 3 cm, para aplicar el método del cilindro de volumen conocido y determinar la Da y, así, con el método gravimétrico, establecer el contenido de HG. Luego, en el laboratorio, con un potenciómetro Methohm 691 se determinó el pH de cada muestra. Además, con el método de Walkley-Black, en aproximadamente 100 g de suelo se determinó el carbono orgánico en cada profundidad. En el área definida, se observaron cuatro perfiles modales del suelo, en función de las cajuelas en los puntos de muestreo, y se realizaron las calicatas y toma de muestras para la clasificación taxonómica.

Para la determinación del COS> y el COe se utilizó la metodología propuesta por Rügnitz, Chacón y Porro (2009), que se describe en la siguiente ecuación:

$$\cos = [\cos] \times \rho_b \times \text{Prof} \times (1 - \text{frag}) \times 10$$

[Ecuación 1.]

Abreviatura	Definición y unidad de medida
cos	Contenido de carbono orgánico del suelo, representativo del tipo de uso de este ($t \cdot ha^{-1} C$).
[\cos]	Concentración de carbono orgánico del suelo para una determinada masa de suelo obtenida del análisis de laboratorio ($g kg^{-1}$ de suelo).
ρ_b	Densidad aparente, masa de suelo por volumen de muestra (cm^3).
Prof.	Profundidad del horizonte o espesor de la capa de suelo en metros (m).
Frag	Volumen porcentual de fragmentos gruesos/100, sin dimensiones.

Se utiliza el multiplicador final 10 para convertir las unidades en $t\text{ ha}^{-1}$. C. Para saber la cantidad de CO_2 emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito, se debe multiplicar esta por 3,67.

Análisis estadístico

A los datos de las variables, derivados de la información recolectada en campo y laboratorio, se les aplicó estadística descriptiva observando el comportamiento de la varianza, a partir de ello, se encontró que con excepción de las variables COS y COe, que fueron tratadas de forma no paramétrica, todas las demás variables pasaron la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de homodasticidad de Levene, lo que permitió realizar un análisis paramétrico de los datos para hacer la comparación entre las medias de los tratamientos a través de un análisis de varianza (modelo lineal general) y una prueba de Tukey para ver las diferencias entre los niveles de factores. Para los análisis estadísticos, se utilizó el programa SPSS Statistics IBM® versión 21.

Resultados y discusión

Caracterización de los suelos en la zona de estudio

En el área definida, se estudiaron 48 cajuelas en función de la malla de muestreo y se determinaron cuatro perfiles modales, en alturas entre 3.200 a 3.500 m.s.n.m. En la figura 3 se indica la distribución de los puntos de muestreo puntual sistemático y la clasificación de los suelos en el área de estudio.

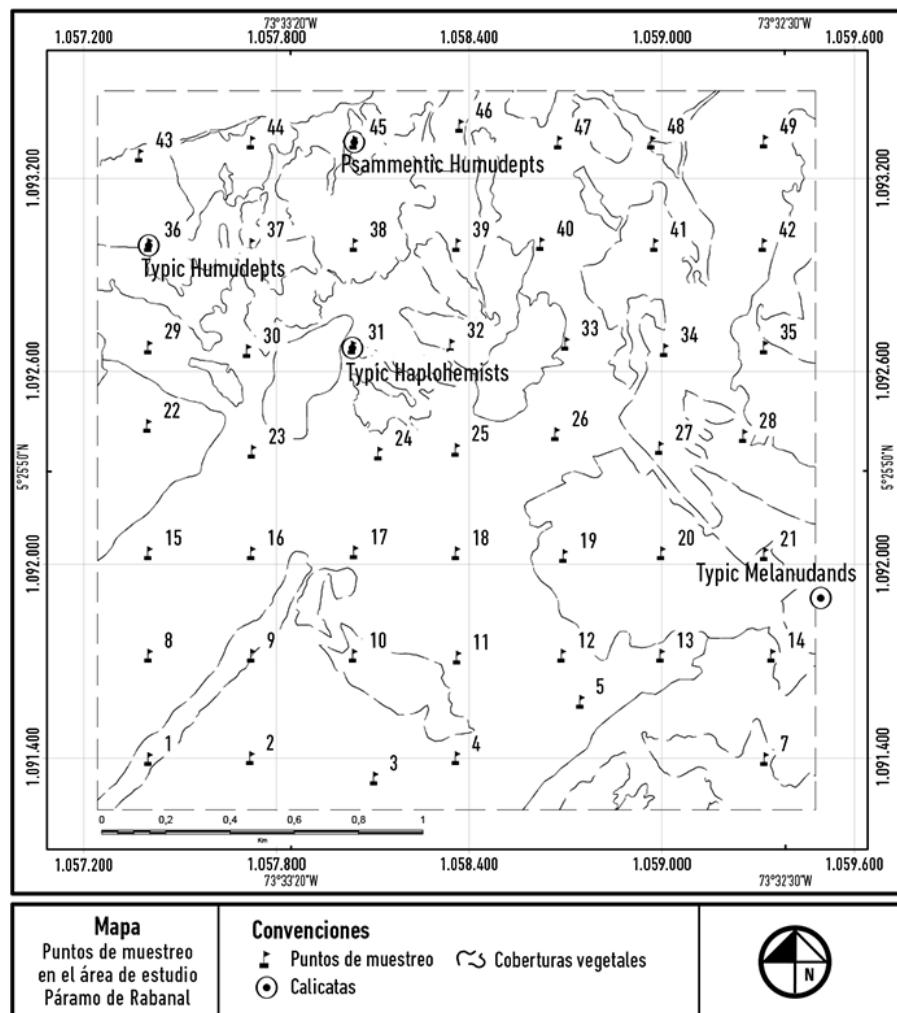


Figura 3.

Mapa puntos de muestreo puntual sistemático y calicatas en el área de estudio.

Nota: la malla de puntos fue diseñada por medio de un software SIG (ArcGIS), las coberturas se explican en la figura 2.

Hacia el noroccidente, en un herbazal denso y bajo de tierra firme con arbustos, de relieve ligeramente ondulado, ubicado en una pendiente de 3 a 7%, se identificó un suelo *Typic Humudepts*, el primer horizonte (30 cm) negro con materiales orgánicos sapricos, un contenido alto de MO de 13,26%, reacción a cenizas volcánicas —en adelante, NaF— y negativo para carbonatos —en adelante, HCl—; el siguiente horizonte presenta texturas medianamente finas (FA) y un porcentaje de MO igual a 7,61. El terreno presenta suelos moderadamente profundos, bien drenados, de textura relativamente gruesa, reacción extremadamente ácida a muy fuertemente ácida, con alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja, ubicados en zonas con alta precipitación, característica típica del páramo de Rabanal.

Hacia el centro-norte de la ventana de muestreo, bajo el forestal de pino, se clasificó un *Psammentic Humudepts*, en un relieve ligeramente ondulado con pendiente de entre 3-7%. En este terreno, los primeros horizontes orgánicos son de color negro y poseen un 10,8% de MO; los horizontes subsecuentes gradualmente aumentan los contenidos de

arena, hasta el horizonte 4 (78-111 cm), de textura arenoso franco, estructura bloque subangulares medios, reacción positiva a NaF y negativa a H_2O_2 y HCl. Este terreno fue clasificado en el subgrupo de *psammentic*, relacionado con altos contenidos de arenas. En general, hay allí suelos moderadamente profundos, bien drenados, de reacción fuertemente ácida, alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natural media.

En la parte central de la ventana de muestreo, bajo un herbazal denso inundable, se caracterizó un *Typic Haplohumists*, en un relieve ligeramente quebrado con pendiente de entre 7-12%. Este terreno presentaba horizontes con MO que poseían grados de descomposición hémicos hasta los 85 cm, de color negro, régimen ácuico, un 29,4% de MO; luego de los 85 cm, sin estructura, reacción positiva a NaF y reacción negativa a HCl y H_2O_2 . Son suelos orgánicos en estado intermedio de descomposición, caracterizados por la presencia de materiales hémicos del suelo en profundidad, donde solo se muestran dos horizontes claramente definidos, lo que comprueba la evolución intermedia.

Hacia el suroccidente, bajo arbustos densos, se caracterizó un *Typic Melanudands*, en un relieve moderadamente quebrado, con pendiente de entre 12-25%. Los primeros horizontes (0-46 cm) de texturas finas (arcillosas) y colores cafés, los siguientes horizontes presentan texturas medianamente finas (franco arcilloso) y estructura en bloques subangulares medios. Reacción positiva a H_2O_2 y NaF y reacción negativa a HCl. Taxonómicamente son andisoles epipedón melánico, caracterizado por colores oscuros, valúe y croma menor de 2; son suelos profundos, bien drenados, de reacción muy fuertemente ácida, de una muy alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja.

Efecto sobre las propiedades analizadas

En la tabla 1 se muestra el resumen estadístico de los datos de las variables, se presenta la media, desviación típica, prueba de normalidad y homodasticidad. Las variables con mayor desviación típica fueron COS y COe, lo que muestra un comportamiento sin normalidad, las variables Da y pH son las que tienen menor desviación típica. Los altos valores de %C y MO en los tratamientos refleja la calidad de estos suelos, en cuanto reservas de carbono, esto se debe principalmente a la baja tasa de mineralización producto de las bajas temperaturas.

Tabla 1.
Estadísticos de los tratamientos

Variable	Profundidad	Cobertura	Media	Desv tip.	K-S	levane
Da (g/cc)	0-15 cm	VP	0,43	0,17	0,2	0,757
		FP	0,69	0,16	0,082	0,804
	15-30 cm	VP	0,54	0,19	0,2	0,804
		FP	0,77	0,18	0,2	0,754
HG (%)	0-15 cm	VP	71,6	11	0,175	0,083
		FP	55,9	8,05	0,127	0,152
	15-30 cm	VP	67,8	9,1	0,2	0,153
		FP	54,8	6,01	0,2	0,076
MO (%)	0-15 cm	VP	13	4,98	0,127	0,92
		FP	9,96	5,76	0,082	0,957
	15-30 cm	VP	11,4	5,38	0,12	0,957
		FP	9,23	5,59	0,063	0,913
C (%)	0-15 cm	VP	7,54	2,89	0,069	0,92
		FP	5,78	3,34	0,067	0,957
	15-30 cm	VP	6,59	3,12	0,12	0,957
		FP	5,35	3,24	0,063	0,913
cos (t/ha)	0-15 cm	VP	46,7	21,3	0,2	0,002
		FP	56,1	28,5	0,01	0,003
	15-30 cm	VP	10,6	61,9	0,034	0,004
		FP	113	56	0,2	0,002
coe (t/ha/año)	0-15 cm	VP	172	78	0,2	0,002
		FP	206	105	0,01	0,003
	15-30 cm	VP	389	227	0,034	0,004
		FP	414	205	0,2	0,002
pH	0-15 cm	VP	3,95	0,25	0,078	0,221
		FP	4,03	0,23	0,07	0,252
	15-30 cm	VP	4,19	0,26	0,2	0,253
		FP	4,39	0,14	0,2	0,23

Datos: las muestras de suelo se estudiaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

(Tunja), para los análisis estadísticos, se utilizó el programa SPSS Statistics IBM® versión 21.

Nota: VP: vegetación de páramo, FP: forestal de pino, Da: densidad aparente, HG: humedad gravimétrica,

C: carbono, COS: carbono orgánico del suelo, COe: carbono orgánico equivalente, pH: potencial de hidrógeno, Prof: profundidad, Trat: tratamiento, Desv. Típ.: desviación típica, K-S: kolmogorov smirnov.

En la figura 4 se muestran los resultados para el %C. Este no presento diferencias estadísticas ($P > 0,05$) entre los tratamientos; sin embargo, se observa un descenso en el valor de la media en las dos profundidades, entre el FP (5,8 - 5,4% respectivamente) y la (7,5 - 6,6% respectivamente), que se debe a la abundancia de vegetación y al tipo de residuo. La especie *Pinus sp* no es nativa de las montañas altas de los andes, de manera que su plantación y crecimiento afectó de manera negativa la cantidad de carbono del suelo que está bajo esta cobertura y, en consecuencia, está disminuyendo la capacidad de fijación de carbono edáfico en el páramo. Cargua et al. (2014) reportan que la cantidad de carbono acumulado en la materia muerta o detritus obtuvo el valor más alto en el estrato de páramo (56,09 Mg C/ha), con una desviación estándar de 8,58, mientras que la plantación forestal tuvo valor medio de 2,97 Mg C/ha, con una desviación estándar de 0,48, lo que evidencia que los aportes de materia orgánica por parte de las plantaciones de pino son menores en comparación con las coberturas de páramo.

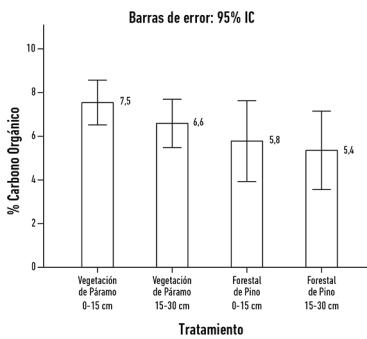


Figura 4.

Porcentaje de carbono del suelo en los diferentes tratamientos.

En la figura 5 se presentan los resultados de los tratamientos para la MO, cuya variable no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos ($P > 0,05$); sin embargo, los resultados de la media muestran una disminución bajo la cobertura FP y, con respecto a la profundidad del suelo, lo primero contrasta con lo reportado por Quichimbo et ál. (2015), quienes encontraron un aumento en el contenido de materia orgánica en los suelos bajo un bosque de pino (340 g/kg^1), en comparación con una cobertura natural de páramo, como son los pajonales (29 g/kg^1). Lo segundo concuerda con lo reportado por Carvajal et ál. (2009), quienes manifiestan que la profundidad del suelo influyó sobre los contenidos de materia orgánica, por lo que se encontró mayor carbono en la capa superficial, con tendencia a disminuir hacia las capas inferiores, con diferencias significativas ($P < 0,05$) entre 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Espinoza-Domínguez et ál. (2012) reportan, en suelos bajo coberturas: silvopastoril, bosque caducifolio, café + chalahuite, café + macadamia, café + cedro rosado, café + plátano y potrero, contenidos de MO (%) de 3,90; 6,70; 3,35; 4,14; 3,82; 4,68 y 3,12, respectivamente, en una profundidad de 0-30 cm.

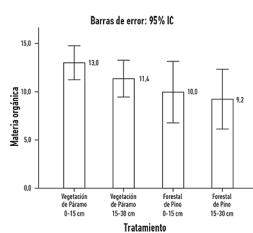


Figura 5.

Materia orgánica del suelo en los diferentes tratamientos.

Las relaciones del pH con el tipo de cobertura tendieron a ser similares (figura 6); sin embargo, las distintas profundidades muestran diferencias estadísticas: la VP en 0-15 cm con un pH de 3,9 tiene diferencias con los tratamientos VP de 15-30 cm ($\text{pH} = 4,2$) y FP de 15-30 cm ($\text{pH} = 4,2$). En general, el pH de la vegetación nativa no fue alterado por la zona antropizada; esto contrasta con lo reportado por Quichimbo et ál. (2015), quienes reportan un valor de pH ligeramente más elevado de las coberturas sin alteración ($\text{pH} = 4,94$) frente a las coberturas más

antropizadas (promedio $\text{pH} = 4,65$), lo que se puede deber al manejo de estas coberturas en el estudio, como son pastos $\text{pH} = 4,78$, pajonal quemado $\text{pH} = 4,80$, cultivo de papa $\text{pH} = 4,3$ y bosque de pino $\text{pH} = 4,73$.

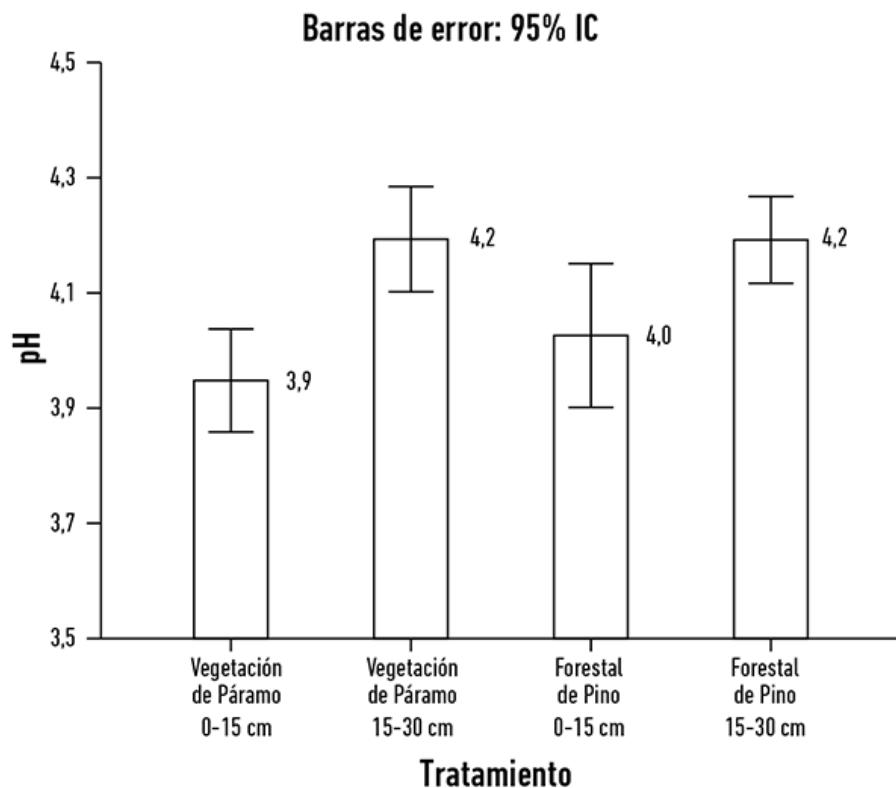


Figura 6.
pH del suelo en los diferentes tratamientos.

La figura 7 muestra cómo el COS presentó diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre las dos profundidades de las mismas coberturas, pero no hubo diferencia entre los datos de las coberturas; sin embargo, se presenta un aumento en el COS del suelo bajo la cobertura FP, que se debe al aumento en la Da registrado bajo esta cobertura. Puesto que el cálculo del COS incluye la multiplicación por la Da, esto ocasiona tal aumento. Es preocupante la segura alteración de las propiedades hidrofísicas, que corresponden a parámetros que son sensibles al aumento de la densidad, como la porosidad, dado que su reducción provoca una menor infiltración y, en general, movimientos del agua en el suelo (Buytaert et ál. 2006; Estupiñán et ál. 2009). Los resultados de nuestro estudio contrastan con los de Zúñiga et ál. (2013), quienes reportan un cálculo de COS en ecosistemas no intervenidos de alta montaña de $520,9 \text{ t ha}^{-1}$ en páramo y $323,6 \text{ t ha}^{-1}$ en bosque alto andino del parque nacional natural Chingaza y, a su vez, de $373,0 \text{ t ha}^{-1}$ en páramo y $254,6 \text{ t ha}^{-1}$ en bosque alto andino del parque nacional natural Los Nevados (Tolima); así mismo, en zonas intervenidas reportan $135,1 \text{ t ha}^{-1}$ en páramo y $141,5 \text{ t ha}^{-1}$ en bosque alto andino del parque nacional natural Chingaza, mientras que estipulan un cálculo de $356,3 \text{ t ha}^{-1}$ en páramo y $217,1 \text{ t ha}^{-1}$ en

bosque alto andino del parque nacional natural Los Nevados. Zúñiga et ál. (2013) resaltan la disminución de COS en las zonas intervenidas en estos ecosistemas, dicha disminución es más marcada en el parque nacional natural Los Nevados, lo que no ocurrió en el páramo de Rabanal, según los datos obtenidos en nuestra investigación. Se debe resaltar que los valores encontrados en los parques nacionales Chingaza y los Nevados son altos respecto de los hallados en este estudio sobre el páramo de Rabanal. Espinoza-Domínguez et ál. (2012) reportan en la zona de mayor producción de café (*Coffea arabica L.*) en México, esto es, la región de Huatusco en el estado de Veracruz, un COS ($Mg \cdot ha^{-1}$) de 62, 86, 54, 50, 58, 73 y 50 en suelos con coberturas: silvopastoril, bosque caducifolio, café + chalahuite, café + macadamia, café + cedro rosado, café + plátano y potrero, respectivamente.

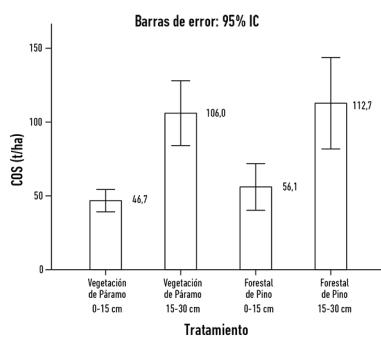


Figura 7.

Carbono orgánico del suelo almacenado en los diferentes tratamientos.

Dado que el COe se obtiene por medio de la multiplicación de la constante 3,67 por el resultado del COS, se comporta estadísticamente de la misma manera, presenta diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre las profundidades, pero no entre las coberturas (figura 8).

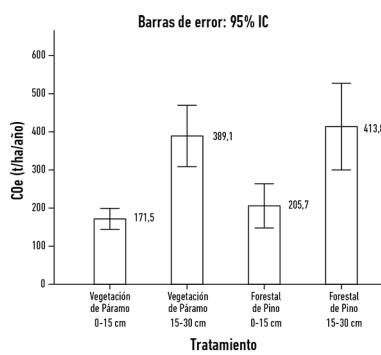


Figura 8.

Carbono equivalente del suelo almacenado en los diferentes tratamientos.

En las figuras 9 y 10 se muestra los resultados para las variables Da y HG, se indican las diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre las coberturas, comprobando la hipótesis de que, en los suelos del páramo de Rabanal, la plantación forestal de coníferas influye en estas propiedades físicas. Las dos profundidades en VP mostraron valores estadísticos diferentes con las densidades aparentes en 0-15 cm y 15-30 cm de la

plantación FP Lo anterior concuerda con los resultados presentados por Quichimbo et ál. (2015), quienes señalan que las densidades aparentes aumentaron bajo coberturas antrópicas (promedio $0,49 \text{ Mg m}^{-3}$) respecto de coberturas naturales de páramo (promedio $0,43 \text{ Mg m}^{-3}$). Así mismo, dichos resultados contrastan con lo reportado por Estupiñán et ál. (2009), quienes expusieron un incremento de la densidad en zonas intervenidas ($0,65 \text{ g/cc}$), respecto de zonas no intervenidas del páramo el Granizo ($0,62 \text{ g/cc}$). Los datos reportados por Espinoza-Domínguez et ál. (2012), en una profundidad de 0-30 cm, muestran densidades aparentes (g/cc) para los sistemas agroforestales café + chalahuite, café + macadamia, café + cedro rosado, café + plátano de $1,12, 0,83, 0,88$ y $0,90$, respectivamente, así como también densidades aparentes de $0,91$ (g/cc) en sistemas silvopastoriles, $0,92$ (g/cc) bajo potrero y $0,74$ (g/cc) en bosque caducifolio, esta última cifra es muy cercana al $0,76$ (g/cc) del FP de 15-30 cm, mientras que se aleja en 53% del $0,43$ (g/cc) de la VP de 0-15 cm.

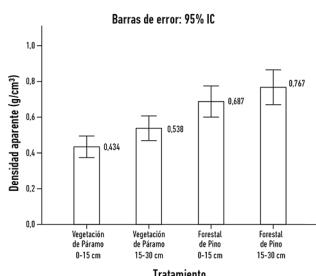


Figura 9.
Densidad aparente del suelo en los diferentes tratamientos.

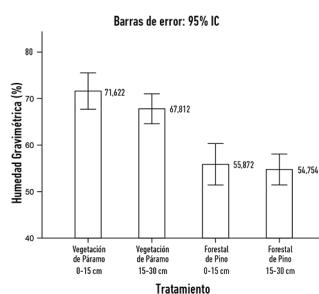


Figura 10.
Humedad gravimétrica del suelo en los diferentes tratamientos.

La densidad baja de estos suelos se da por sus características orgánicas, su porosidad alta y la gran cantidad de especies vegetales y sus sistemas radiculares en los primeros centímetros del suelo, lo que les confiere gran capacidad de almacenamiento de agua (Daza et ál. 2014). Como la plantación forestal es un monocultivo, los aportes de MO son menores, dado que solo hay un sistema radicular y además, al hacer la siembra de la plantación, se debieron realizar disturbios en el suelo, lo que pudo generar un aumento en la Da y desencadenar un menor espacio poroso que dificulta la retención y el movimiento del agua (Buytaert et ál. 2005; Buytaert et ál. 2006; Estupiñán et ál. 2009; Schrumpf et ál. 2011; Stockmann et ál. 2013). La anterior situación implica que, en un área

aproximada de 1.000 ha de pino sembrada para explotación privada en el páramo de Rabanal, las condiciones edáficas no están siendo aprovechadas de la mejor manera para la acumulación de agua, lo cual es grave, ya que este páramo provee del preciado líquido a cerca de 300.000 personas en Tunja y algunas poblaciones aledañas.

Los valores más altos de HG los presento la VP de 0-15 cm y de 15-30 cm (71,62% y 67,81%, respectivamente), respecto de FP (55,87% y 54,75%, respectivamente). Quichimbo et ál. (2015) reportan una disminución de los contenidos de humedad, saturación y capacidad de campo en los suelos de páramo intervenidos, bajo coberturas de bosque de pino, cultivo de papa, pastos y pajonal quemado, en comparación con las coberturas naturales de almohadillas, bosque de *polylepis* (siete cueros, colorado) y pajonal. Los resultado de algunos estudios revelan la elevada evapotranspiración de los forestales de pino, así como los efectos negativos que producen estos sistemas intensivos en los ecosistemas de páramo, los cuales en el ciclo hidrológico, ya que la especie *Pinus sp* reduce la producción de agua en un promedio de 242 mm/año⁻¹ (Buytaert et ál. 2007; Crespo et ál. 2010).

En campo se observó que la sombra de los árboles de pino y la cobertura orgánica de la hojarasca provocan poca o nula regeneración de la vegetación nativa y la extinción de la biodiversidad del páramo; este efecto se acentúa más a medida que se incrementa la edad o altura de la plantación, lo que concuerda con los resultados de Wesenbeeck et ál. (2003), quienes realizaron un estudio en el Cerro de Esmeralda (Guatavita) y afirmaron que entre más alta es la cobertura de *Pinus patulamás* baja es la similitud botánica con los levantamientos en la zona de subpáramo. Dicha investigación concluye que la forestación con *Pinus patula* tiene una fuerte influencia negativa en la diversidad y composición de la vegetación del subpáramo en su zona de estudio.

Por su parte, Hofstede et ál. (2002) no encontraron un impacto general negativo de las plantaciones de pino en los Andes ecuatorianos, puesto que podía observarse algunos casos donde había regeneración y crecimiento de especies leñosas nativas. Igualmente, estos autores aclaran que hay tendencias que muestran que los suelos bajo plantaciones de pino son más secos y menos orgánicos, como se demostró en este estudio. De igual modo, se observó la extracción de la madera, frente a lo cual es importante pensar en los efectos destructivos que tiene dicha actividad para el suelo y la vegetación nativa; estudios sobre la amortiguación de este impacto ayudarían a la conservación del páramo de Rabanal, que provee de agua a la población rural y urbana de Tunja.

Conclusiones

En este estudio se evidencio que la plantación FP en el páramo de Rabanal influye de manera negativa en las propiedades hidrofísicas del suelo. Por su parte, la Da de 0-15 cm en esta cobertura fue un 36,8% mayor que en VP en la misma profundidad, por lo cual, la HG presentó una disminución de 22% bajo el FP en relación con la cobertura natural, lo

que indica la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua. Lo anterior implica que, en un área aproximada de 1.000 ha de pino, que están sembradas para explotación privada en el páramo de Rabanal, las condiciones edáficas no están siendo aprovechadas de la mejor manera para la acumulación de agua.

Así mismo, aunque no hubo diferencias estadísticas en el %C para ninguna cobertura ni profundidad, en el FP de 0-15 cm sí se presentó una diminución de 22,6% de %C del suelo, mientras que respecto de la cobertura VP hubo una disminución de 18,1% entre los 15 y 30 cm, esto se debe a la abundante vegetación y tipo de residuo, que no se presenta en el área del monocultivo de pino. Por lo anterior, se esperaría que el COS se comportara de manera similar; sin embargo, esta variable solo presentó diferencias estadísticas respecto de la profundidad de muestreo, mas no en las coberturas, esto se debe a que en el cálculo del COS se requiere el uso de la Da y esta, al ser más alta en la zona forestal, aumenta el resultado del COS, pero, como se explicó, este aumento en la Da no es favorable para este ecosistema. En todo caso, en los suelos de la zona de estudio se presenta una capacidad de captura de carbono promedio de 108 ton/ha en los 30 cm, que se debe a las características orgánicas de los suelos, taxonómicamente jóvenes, con órdenes como histosoles, andisoles e inceptisoles, en una zona de alta precipitación y biodiversidad.

Durante los muestreos, fue evidente la nula o poca vegetación nativa bajo los forestales de pino, lo que ha causado la extinción de la biodiversidad del páramo. Por esto y las condiciones edáficas analizadas y mencionadas arriba, no se recomienda el uso de estas especies exóticas para la reforestación y, mucho menos, para la explotación en el complejo de páramos de Rabanal y el río Bogotá.

Referencias

- Balthazar, Vincent, Veerle Vanacker, Armando Molina, y Eric Lambin. 2015. "Impacts of Forest Cover Change on Ecosystem Services in High Andean Mountains." *Ecological Indicators* 48:63-75. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.07.043.
- Buytaert, Wouter, Bert De Bièvre, Guido Wyseure, y Jozef Deckers. 2005. "The Effect of Land-use Changes on the Hydrological Behaviour of Histic Andosols in south Ecuador." *Hydrological Processes* 19 (20): 3985-3997. doi: 10.1002/hyp.5867.
- Buytaert, Wouter, Francisco Cuesta-Camacho, y Conrado Tobón. 2010. "Potential Impacts of Climate Change on the Environmental Services of Humid Tropical Alpine Regions." *Global Ecology and Biogeography* 20 (1): 19-33. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00585.xx.
- Buytaert, Wouter, Rolando Celleri, Bert De Bièvre, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, Jozef Deckers, y Robert Hofstede. 2006. "Human Impact on the Hydrology of the Andean Páramos." *Earth-Science Reviews* 79 (1-2): 53-72. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.06.002.
- Buytaert, Wouter, Vicente Iñiguez, y Bert De Bièvre. 2007. "The Effects of Afforestation and Cultivation on Water Yield in the Andean Páramo."

- Forest Ecology and Management 251 (1-2): 22-30. doi: 10.1016/j.foreco.06.035.
- Cargua, Franklin E., Marco V. Rodríguez, Celso Recalde, y Luis Vinueza. 2014. “Cuantificación del contenido de carbono en una plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en estrato de Páramo de Ozogoche Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador.” *Información Tecnológica* 25 (3): 83-92. doi: 10.4067/S0718-07642014000300011.
- Carvajal, Andrés F., Alexander Feijoo, Heimar Quintero, y Marco A. Rondón. 2009. “Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos.” *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9 (3): 222-235. doi: 10.4067/S0718-27912009000300005.
- Corpoboyacá (Corporación Autónoma Regional de Boyacá). 2008. *De Boyacá en los páramos: mi tierra*. Tunja: Corpoboyacá.
- Crespo Patricio, Rolando Céller, Wouter Buytaert, Jan Feyen, Vicente Iñiguez, Pablo Borja, y Bert De Bièvre. 2010. “Land Use Change Impacts on the Hydrology of wet Andean Páramo Ecosystems.” *LAHS International Association of Hydrological Sciences, Status and Perspectives of Hydrology in Small Basin* 336:71-76.
- Daza Torres, Martha C., Fanny Hernández Flórez, y Flor Alba Triana. 2014. “Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia.” *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 67 (1): 7189-7200. doi: 10.15446/rfnam.v67n1.42642.
- Espinoza-Domínguez, William, Lakshmi Reddiar Krishnamurthy, Antonio Vázquez-Alarcón, y Antonio Torres Rivera. 2012. “Carbon Stocks in Agroforestry Systems with Coffee Plantations.” *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18 (1): 57-70. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030.
- Estupiñán, Luis H., Jaime Eduardo Gómez, Víctor Javier Barrantes, y Luis Fernando Limas. 2009. “Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo el Granizo (Cundinamarca - Colombia).” *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica* 12 (2): 79-89.
- Aguilar, Jorge, y Andrés Iroume Arrau. 1995. “Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico.” *Bosque* 16 (2): 3-12.
- Güiza Suárez, Leonardo. 2011. “Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia.” *Opinión Jurídica edición especial*: 123-140.
- Hofstede, Robert, Jeroen P. Groenendijk, Ruben Coppus, Jan C. Fehse, y Jan Sevink. 2002. “Impact of Pine Plantations on Soils and Vegetation in the Ecuadorian High Andes.” *Mountain Research and Development* 22 (2): 159-167. doi: 10.1659/0276-4741(2002)022[0159:IOPPOS]2.0.CO;2.
- Hofstede, Robert, Pool Segarra, y Patricio Mena V. 2003. *Los Páramos del mundo: proyecto Atlas Mundial de páramos*. Quito: Eco-Ciencia Fundación Ecuatoriana de Estudios Ecológicos (EC), Global Peatland Initiative, National Committee of The Netherlands (IUCN).
- IAvH (Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt), CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca), Corpoboyacá, y CORPOCHIVOR (Corporación Autónoma de Chivor). 2008. *Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo de rabanal*. Convenio interadministrativo n.º 07-06-263-048 (000404). Tunja.

- Morales-Betancourt, Juan Alejandro, y Jaime Vicente Estévez-Varón. 2006. "El páramo: ¿un ecosistema en vía de extinción? Atlas de páramos de Colombia." *Revista Luna Azul* 22:39-51.
- Morales, Mónica, Javier Otero, Thomas Van Der Hammen, Andrea Torres, Camilo Cadena, Carlos Pedraza, Nelly Rodríguez, Carol Franco, Juan Betancourth, Édgar Olaya, Ernesto Posada, y Luciano Cárdenas. 2007. *Atlas de páramos de Colombia*. Bogotá: IAvH.
- Quichimbo, Pablo, Gustavo Tenorio, Pablo Borja, Irene Cárdenas, Patricio Crespo, y Rolando Céller. 2015. "Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador." *Suelos Ecuatoriales* 42 (2): 138-153.
- Rügnitz Tito, Marcos, Mario Chacón León, y Roberto Porro. 2009. *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Lima: Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF), Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).
- Schrumpf, Marion, E. D. Schulze, Klaus Kaiser, y Jens Schumacher. 2011. "How Accurately can Soil Organic Carbon Stocks and Stock Changes be Quantified by Soil Inventories?" *Biogeosciences* 8 (5): 1193-1212. doi: 10.5194/bg-8-1193-2011.
- Stockmann, Uta, Mark A. Adams, John W. Crawford, Damien J. Field, Nilusha Henakaarchchi, Meaghan Jenkins, Budiman Minasny, Alex B. McBratney, Vivien de Remy de Courcelles, Kanika Singh, Ichsani Wheeler, Lynette Abbott, Denis A. Angers, Jeffrey Baldock, Michael Bird, Philip C. Brookes, Claire Chenu, Julie D. Jastrow, Rattan Lal, Johannes Lehmann, Anthony G. O'Donnell, William J. Parton, David Whitehead, y Michael Zimmermann. 2013. "The Knowns, Known Unknowns and Unknowns of Sequestration of Soil Organic Carbon." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164 (1): 80-99. doi: 10.1016/j.agee.2012.10.001.
- Wesenbeeck, Bregje K. van, Tom van Mourik, Joost F. Duivenvoorden, y Antoine M. Cleef. 2003. "Strong Effects of a Plantation with *Pinus patula* on Andean Subpáramo Vegetation: A Case Study from Colombia." *Biological Conservation* 114 (2): 207-218. doi: 10.1016/S0006-3207(03)00025-9.
- Zimmermann, Michael, Patrick Meir, Miles R. Salman, Anna Fedders, Adam Gibbon, Yadvinder Malhi, Dunia H. Urrego, Mark B. Bush, Feeley Kenneth, Karina C. Garcia, Greta C. Dargie, Wiliam R. Farfan, Bradley P. Goetz, Johnson T. Wesley, Kline Krystle M. Andrew T. Modi, Natividad M. Q. Rurau, Brian T. Staudt, y Flor Zamora. 2010. "No Differences in Soil Carbon Stocks across the Tree Line in the Peruvian Andes." *Ecosystem* 13 (1): 62-74. doi: 10.1007/s10021-009-9300-2.
- Zúñiga Escobar, Orlando, Enrique Javier Peña Salamanca, Alba Marina Torres González, Ramiro Cuero Guependo, y Julián Andrés Peña Ospina. 2013. "Assessment of the Impact of Anthropic Activities on Carbon Storage in Soils of High Montane Ecosystems in Colombia." *Agronomía Colombiana* 31 (1): 112-119.

Notas

- 1 Este artículo se realizó dentro del proyecto “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña, en los complejos de paramo Rabanal, Pisba y Altiplano cundiboyacense” (SIG 1724), siendo un trabajo colaborativo entre la Corporación Autónoma de Boyacá (CORPOBOYACÁ) y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Notas de autor

- 2 Ingeniero agrónomo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sus líneas de investigación son suelos, sistemas de información geográfica y meteorología.
- 3 Ingeniero agrónomo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Investigador asociado a Colciencias. Sus líneas de investigación son suelos, sistemas de información geográfica, riego y nutrición mineral.
- 4 Ingeniero agrónomo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y magíster en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Bogotá). Profesor asociado de la Facultad de Ciencias Agropecuarias - Escuela de Ingeniería Agronómica y director del Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible (GIPSO), Investigador Junior de Colciencias. Sus líneas de investigación son suelos, sistemas de información geográfica y agroclimatología.