

# Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia

## Soil changes after a fire event in a páramo ecosystem: Los Nevados National Natural Park, Colombia

*Juan Carlos Camargo-García<sup>1\*</sup>, Miguel Ángel Dossman<sup>1†</sup>, José Alexander Rodríguez<sup>2††</sup>, Ligia María Arias<sup>2‡</sup>, y Jesús Hernando Galvis-Quintero<sup>3‡‡</sup>*

<sup>1</sup>Profesor, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira. <sup>2</sup>Investigador, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira. <sup>3</sup>Profesor, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Apartado Aéreo 237, Palmira, Valle, Colombia.

\*Autor para correspondencia: [jupipe@utp.edu.co](mailto:jupipe@utp.edu.co); [†mdossman@utp.edu.co](mailto:†mdossman@utp.edu.co); [††pauloalejo@utp.edu.co](mailto:††pauloalejo@utp.edu.co); [‡larias@utp.edu.co](mailto:‡larias@utp.edu.co); [‡‡jgalvisq@unal.edu.co](mailto:‡‡jgalvisq@unal.edu.co)

Rec.: 18.10.11 Accept.: 01.06.12

### Resumen

En 2006 ocurrió un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia, que afectó aproximadamente 2400 ha de ecosistema de páramo de sectores aledaños a la laguna del Otún (4 ° 46' 58.4" N y 75° 24' 26.8" O). Teniendo en cuenta la posible afectación de algunos servicios ecosistémicos proveídos por el suelo y la necesidad de encontrar variables que puedan ser utilizadas como indicadores del estado de este recurso, se realizó una evaluación de las propiedades físicas y químicas de los suelos en áreas afectadas (AA) y no afectadas (NA) por el incendio. Las evaluaciones se tuvieron inmediatamente después del evento (2006), dos años (2008) y tres años (2009) después. Se incluyeron áreas donde se implementaron estrategias de restauración y dos posiciones en el relieve: valle (turberas) y laderas. Para identificar diferencias en las características del suelo evaluadas entre sitios afectados y no-afectados, posiciones topográficas y los tratamientos de restauración, se hizo una prueba no-paramétrica de Kruskal-Wallis. Posteriormente, para verificar relaciones entre variables, se realizó un análisis de correlación usando el coeficiente de Spearman. En general, la posición de valle mostró los cambios más drásticos en el suelo a través del tiempo de evaluación. Allí, más del 50% de la materia orgánica se perdió, generando cambios también en algunas propiedades físicas como la densidad aparente y la estabilidad estructural, que después de tres años, y a pesar de las actividades de restauración, muestran evidentes problemas de degradación. Con los resultados obtenidos ha sido posible definir variables indicadoras de las condiciones del suelo, que podrían ser usadas en programas de monitoreo de este recurso. Así mismo, se evidencia que los procesos de restauración en este ecosistema son lentos y se requiere un tiempo prolongado para generar cambios positivos en las propiedades de los suelos afectados, que incluso superan el empleado en esta investigación. De esta manera, determinar el efecto de las estrategias de restauración y definir cuáles pueden ser las más apropiadas es de hecho un proceso que toma tiempo. Por tal razón, es imperativo evitar cualquier actividad o evento que genere deterioro sobre este ecosistema.

**Palabras clave:** Colombia, ecosistema de páramo, incendios forestales, Parque Nacional Natural Los Nevados, propiedades físico-químicas del suelo.

## Abstract

A fire event occurred in 2006, affected about 2400 ha of Páramo ecosystems located on the surroundings areas of Otún lagoon (4 ° 46' 58.4" N y 75° 24' 26.8" W) in the Nevados Natural National Park, Colombia. Because of the worth of this area associated with the supplies of ecosystems services and the need for finding variables as indicators of soil conditions, in areas affected and non-affected by fire physical and chemical properties of soils were evaluated. The soil assessment was conducted out in areas where restoration strategies had been implemented and on two geomorphologic positions (Valleys and hills). Samples for monitoring soils were done at once of the fire, two years (2008) and three years (2009) later. To identify differences in soil characteristics evaluated between sites affected and non-affected, topographic positions and restoration treatments, a nonparametric test Kruskal-Wallis was applied. Subsequently, using the correlation coefficient of Spearman the relationships between variables were analyzed. Soils of valley positions were drastically affected and more than 50% organic matter was lost. Consequently, physical properties of soils such as bulk density and structural stability were also deteriorated. Three years after the implementation of restoration activities, there are not evidences of the improvement of soils conditions; in fact, some properties tend to be more deteriorated. Results obtained in this study permit to elucidate some variables which could be used as indicators for monitoring programs with emphasis on this resource. Also, the fragility of Páramo ecosystems is showed by means of soils deterioration. The restoration of soils properties affected by fire is indeed a very slow process even beyond of the time used in this study. In fact, to determine the effect of restoration strategies and to define those more adequate might take a long time. Therefore, it is imperative to avoid any activity or event capable of generating deterioration of this strategic ecosystem.

**Key words:** Colombia, forest fires, Los Nevados Natural Park, páramo ecosystem, physicochemical properties of soil.

## Introducción

Los páramos son ecosistemas húmedos de alta montaña que se encuentran en la cordillera de los Andes entre Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, y se extienden en una franja altitudinal desde los 3500 m.s.n.m., conformando principalmente valles glaciáricos donde se ubican lagos, humedales y turberas, con predominio de vegetación de gramíneas con algunos fragmentos de arbustos y bosques de baja altura (Luteyn, 1992; Castaño, 2002; Hofstede *et al.*, 2003), destacándose especies como frailejones (Hofstede *et al.*, 1995; Hedberg, 1992; Vargas y Zuluaga, 1986), vegetación que se ha adaptado a condiciones específicas como baja temperatura, baja presión atmosférica, alta radiación ultravioleta y fuertes vientos que generan desecación (Luteyn, 1992). En estas condiciones, y debido a la fragilidad del ecosistema, la inclusión de nuevas especies, aun forestales, podría generar cambios no deseados (Buytaert *et al.*, 2007; Hofstede *et al.*, 2002).

En Suramérica, los páramos ocupan cerca de 75,000 km<sup>2</sup>, cumplen funciones importantes y proveen servicios ecosistémicos para cerca de 10 millones de personas (Bu-

ytaert *et al.*, 2006a). Entre estos servicios se pueden mencionar la acumulación de grandes cantidades de carbono orgánico en el suelo (Poulenard *et al.*, 2002) y la mitigación del cambio climático como sumideros de carbono. Otras funciones, como la regulación hídrica, que es de gran importancia en la zona de estudio, pueden verse favorecidas por los altos contenidos de materia orgánica y el material parental de los suelos (Poulenard *et al.*, 2001) predominantemente piroclástico, que forman complejos órgano-minerales que contribuyen a aumentar la capacidad de retención de agua.

En julio de 2006, en el Parque Nacional Natural Los Nevados, ocurrió un incendio forestal que afectó los sectores aledaños a la Laguna del Otún (4 ° 46' 58.4" N y 75° 24' 26.8" O): Lomabonita, La Leona, Bagaseca y El Bosque, cubriendo aproximadamente 2.400 ha de vegetación de páramo (Loteró *et al.*, 2007). Este evento generó efectos negativos sobre distintos recursos naturales y los ecosistemas pajonal - frailejonal, matorrales y turberas, en una zona estratégica de producción de bienes y servicios ecosistémicos en jurisdicción del departamento de Risaralda,

en Colombia. Posteriormente se han implementado distintas estrategias de restauración ecológica, que incluyen métodos activos y pasivos con el fin de mejorar las condiciones de los ecosistemas afectados (Loterio *et al.*, 2010). No obstante, debido a la magnitud del impacto este proceso continúa y se requieren mayores periodos para determinar de qué manera estas estrategias contribuyen a la restauración de los ecosistemas y cuáles resultan más eficientes.

La génesis del recurso suelo es un proceso muy lento (Malagón, 2005), no obstante la degradación de éste puede ocurrir rápidamente y restaurarlo puede tomar mucho tiempo. Después de los incendios se generan cambios en las propiedades del suelo cuya corrección resulta difícil (Mils, 2006; Vargas *et al.*, 2002; Vargas y Rivera-Ospina, 1990), razón por la cual es importante conocer cuáles y de qué manera resultan más afectadas algunas características de los suelos luego de este tipo de eventos.

Con el propósito de contribuir a orientar la forma más adecuada de promover estrategias de restauración ecológica posteriores a un incendio en ecosistema de páramo, en este trabajo se estudiaron los cambios en algunas propiedades químicas y físicas de los suelos en el área afectada por el incendio ocurrido en 2006, en la zona de influencia de la laguna del Otún. Cabe resaltar que aunque los organismos del suelo constituyen una importante fuente de información para evidenciar cambios en este recurso, no fueron evaluados por limitaciones logísticas inherentes a esta investigación.

### **Materiales y métodos**

El área de estudio hace parte del Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia, específicamente en la zona de influencia de la laguna del Otún, donde se presentó un incendio entre el 5 y el 12 de junio de 2006. Dicho evento afectó un total de 2.374 ha circunscritas en el departamento de Risaralda. Esta área se ubica entre las coordenadas 4 ° 46' 58.4" N y 75 ° 24' 26.8" O, la cual se encontraba, según Loterio *et al.* (2007), en su mayoría cubierta por vegetación de páramo (pajonal, frailejón, matorrales y turberas).

En términos geomorfológicos, la zona es un complejo de colinas y lomeríos, laderas, zonas semiplanas y valles estrechos. Los suelos en las partes de mayor pendiente se originaron a partir de cenizas volcánicas y en las zonas planas y cóncavas a partir de materiales orgánicos (IGAC, 1995), aunque han tenido influencia de cenizas volcánicas. La precipitación anual estimada, promedio, es de 1096 mm y la temperatura promedio de 7 °C (Loterio *et al.*, 2007).

### **Diseño de muestreo**

Para la evaluación de las propiedades físicas y químicas de los suelos se hizo un muestreo sistemático en dos etapas. En la primera se seleccionaron unidades primarias, las cuales correspondieron a áreas afectadas y no-afectadas por el incendio. Dentro de cada unidad primaria se definieron unidades secundarias de acuerdo con las geoformas predominantes: valle estrecho y ladera. Luego, dentro de cada una de estas últimas se definieron tres parcelas de muestreo de 10 m x 10 m. En total se seleccionaron 18 parcelas para evaluación con muestreos de suelo que se realizaron en 2006 —dos semanas después del incendio—, y en 2008 y 2009. Es importante notar que, a pesar de la alta variabilidad que se puede presentar en las propiedades físico-químicas de los suelos, asociada con el material parental, en los páramos la posición topográfica parece tener un efecto significativo en el cambio de algunas de estas propiedades (Buytaert *et al.*, 2006a).

Para los análisis de las propiedades químicas, en cada parcela se tomó una muestra compuesta entre 0 cm y 25 cm de profundidad. Para los análisis de las propiedades físicas, en cada parcela se eligieron al azar tres puntos entre 0 cm y 15 cm de profundidad donde se tomaron muestras disturbadas en bolsas y no-disturbadas en cilindros de volumen conocido. La elección de la profundidad se hizo teniendo en cuenta la representatividad del suelo que estuvo más expuesto al incendio.

Para los análisis químicos, las muestras de suelo fueron enviadas al Laboratorio de Química de Suelos de la Universidad Tecnológica de Pereira y para la determinación

de las propiedades físicas al Laboratorio de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Las propiedades químicas evaluadas fueron: pH, materia orgánica (M.O.), nitrógeno total (N total), fósforo (P), capacidad de intercambio catiónico (CIC), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y aluminio intercambiable (Al) (Cuadro 1). Las propiedades físicas medidas fueron: densidad aparente (D.A.), densidad real (D.R.), porosidad total, conductividad hidráulica, permeabilidad al aire, curvas de retención de humedad, humedad gravimétrica y volumétrica, distribución de agregados por tamaño, agregados estables al agua y textura (% arena, limo y arcilla) (Cuadro 2).

Las bases totales se calcularon a partir de los cationes, la saturación de aluminio a partir de su peso relativo respecto a la capacidad de intercambio catiónica efectiva. Así mismo, el carbono orgánico (CO) se calculó a partir de la materia orgánica (M.O.) ( $CO = MO/1724$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a partir del CO, la D.A, la profundidad (Schlegel *et al.*, 2001) y el factor 44/12 o relación del peso

molecular  $CO_2/CO$ . De la misma manera, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAS) se calculó a partir de las curvas de retención de humedad.

### Análisis de los datos

Teniendo en cuenta que el muestreo fue sistemático, sin aleatorización al momento de seleccionar el área de muestreo, se aplicó la prueba no-paramétrica de Kruskal-Wallis para identificar diferencias estadísticas en las características del suelo, evaluadas entre sitios afectados y no-afectados, posiciones topográficas y tratamientos de restauración. Posteriormente, para verificar relaciones entre variables, se hizo un análisis de correlación con el coeficiente de Spearman. Los análisis se realizaron usando el software estadístico SPSS 10 para Windows (Ferrán, 2001).

## Resultados y discusión

### Cambios en las propiedades químicas del suelo

Cuando las comparaciones entre sitios se realizaron considerando solamente el efecto

**Cuadro 1.** Propiedades químicas evaluadas y métodos de determinación.

Propiedad	Método
pH	Agua destilada
Materia orgánica (%)	Walkley-Black Colorimetry
Nitrógeno total (%)	Kjeldahl
Potasio intercambiable (cmol/kg)	Acetato de amonio
Calcio intercambiable ( cmol/kg)	Acetato de amonio
Magnesio intercambiable (cmol/kg)	Acetato de amonio
Sodio intercambiable (cmol/kg)	Acetato de amonio
Aluminio intercambiable (cmol/kg)	KCI - IM EAA
Fósforo (mg/kg)	Bray II Colorimetría Bray Kurtz
Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)	Acetato de amonio 1N, pH 7.0

**Fuente:** Laboratorio de Química de Suelos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

**Cuadro 2.** Propiedades físicas evaluadas y métodos de determinación.

Propiedad	Método
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	Método de cilindros
Densidad real ( $g/cm^3$ )	Método del picnómetro
Porosidad total (%)	Calculada a partir de las densidades
Conductividad hidráulica (cm/h)	Permeámetro
Agregados estables al agua (%)	Método de Yoder
Distribución de agregados por tamaño (%)	Tamizado y movimiento de Sharker
Resistencia a la penetración ( $kg/m^2$ )	Penetrómetro
Curvas de retención de humedad	Olla a presión
Textura (% arcilla, % arena, % limo)	Bouyoucos

**Fuente:** Laboratorio de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

del incendio, todas las variables químicas analizadas presentaron cambios significativos ( $P < 0.05$ ) excepto el fósforo (P). A pesar de que el pH, en promedio, aumentó ligeramente para los suelos afectados, las bases mostraron valores más bajos ( $P < 0.05$ ) para estos sitios, siendo la saturación de bases sólo 35% del valor encontrado en sitios no-afectados por el incendio (28.9% vs. 10.2 %). Los efectos más drásticos se observan en la M.O. del suelo, que pasó de 31% para 12% después del incendio, tendencia que consecuentemente también se observó para N total y carbono orgánico (CO).

El CO entre 0 cm y 25 cm de profundidad en suelos no-afectados de las zonas de valle fue de 69 t/ha y en laderas de 103 t/ha, valores que son equivalentes a 302 t/ha y 378 t/ha de CO<sub>2</sub>, respectivamente. En Ecuador, en suelos de origen volcánico y ecosistemas de páramo, Podwojewski (2006) y Poulénard *et al.*, (2001) encontraron altos valores de carbono almacenado. Para evitar sobre-estimar el contenido de carbono en el suelo se usó la densidad de los sitios no-afectados para el cálculo de la masa del suelo, debido a que es factible que la D.A. del suelo en la superficie aumente debido a procesos erosivos (Moreno y Lara 2003).

Después del incendio, sin ajuste de la D.A. la tendencia mostró un incremento en el

carbono orgánico (CO -t/ha); cuando se hizo el ajuste, los valores de CO tendieron a ser menores especialmente en la posición valle (Cuadro 3), no obstante presentaron valores que pueden ser considerados como altos, en comparación con suelos de otros ecosistemas. En los ecosistemas de páramo andinos los suelos tienen una importante capacidad de almacenamiento de carbono debido a las condiciones de baja temperatura, bajas tasas de mineralización y de reciclaje de nutrientes, que favorecen la acumulación de la M.O. en el suelo (Rondón *et al.*, 2002).

Al considerar las características de la vegetación de este ecosistema en el que predominan gramíneas de porte bajo, el suelo es un importante sumidero de carbono, lo que ayuda a la estabilización del CO<sub>2</sub> atmosférico y del clima global. A este proceso contribuyen, además, la baja temperatura y la formación de complejos órgano-minerales entre la M.O. y materiales amorfos, los que han influenciado de manera importante la formación de los suelos en esta zona. Estos complejos son de difícil ruptura y por tanto muy estables (Ballesteros *et al.*, 2002).

Cuando la posición topográfica (valle y ladera) se incluye en el análisis, el pH muestra una tendencia a ser más alto ( $P < 0.05$ ) en las zonas afectadas por el incendio, con el valor más alto en el 2008 en ambas posiciones. Los

**Cuadro 3.** Cambios en pH, nitrógeno total, la materia orgánica y carbono orgánico en los suelos de valle y ladera entre 0 y 25 cm de profundidad, después de un incendio en ecosistema de páramo. Años 2006, 2008 y 2009.

Propiedad		Valle				Ladera			
		NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)	NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)
pH	Prom.	4.97c	4.93c	5.37a	5.21abc	5.00c	5.05abc	5.34a	5.22abc
	D.E.	0.15	0.29	0.11	0.23	0.001	0.21	0.13	0.15
N (%)	Prom.	1.39a	0.68b	0.49c	0.35d	0.46cd	0.54cd	0.45cd	0.45cd
	D.E.	0.17	0.11	0.07	0.08	0.11	0.15	0.06	0.06
M.O. (%)	Prom.	43.27a	20.97b	12.93c	8.55cd	11.75bcd	14.65bcd	11.50cd	11.40cd
	D.E.	10.10	5.24	2.54	2.50	3.32	5.30	1.80	1.94
CO (%)	Prom.	25.10a	12.16b	7.50c	4.96cd	6.82cd	8.50cd	6.67cd	6.61cd
	D.E.	5.86	3.04	1.47	1.45	1.93	3.08	1.04	1.12
C/ N	Prom.	17.94a	17.69a	15.18ab	14.02b	14.89b	15.69ab	14.74b	14.79b
	D.E.	1.90	1.85	0.72	0.68	0.77	1.40	0.45	0.52
CO (t/ha)	Prom.	69.5b	93.1ab	107.6ab	82.4b	107.5ab	94.2ab	115.2a	120.3a
	D.E.	16.6	45.9	14.1	13.2	30.6	31.6	18.8	18.2
COa (t/ha)	Prom.	69.0b	33.4bc	20.6c	13.6c	107.3ab	133.8a	105.1a	104.2a
	D.E.	16.1	8.4	4.0	4.0	30.4	48.4	16.4	17.7

NA\* = no afectado, promedio años 2006 al 2009; AF= afectado; N= nitrógeno total; MO = materia orgánica; CO = Carbono orgánico; C / N = carbono/nitrógeno; COa = carbono orgánico ajustado por la densidad aparente del suelo; DE = desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

valores, sin embargo, son muy similares en las posiciones topográficas, tanto de áreas afectadas como no-afectadas (Cuadro 3).

En general, después del incendio se presentó una reducción ( $P < 0.05$ ) de la M.O. cercana a 50%. El N total, que depende en gran parte de la M.O., mostró la misma tendencia con cambios en las zonas de valle, donde disminuyó ( $P < 0.05$ ) luego del incendio y mostró un valor 65% más bajo dos años después (2008). El cambio en la M.O. parece tener efecto en el incremento del pH y en la reducción significativa ( $P < 0.05$ ) de la C.I.C. y las bases totales, que pasaron de 73 para 19 cmol/kg y de 18 para 2 cmol/kg, respectivamente.

En las áreas de laderas, el comportamiento fue menos dinámico y mantuvo valores muy similares, inclusive entre los sitios afectados y no-afectados por el incendio. Los resultados anteriores muestran un efecto severo sobre los suelos de la posición valle, debido posiblemente al estado de la M.O. y su menor grado de descomposición (Cuadro 3).

Según Buytaert *et al.* (2006b) la proximidad a drenajes y la topografía convexa y plana en las posiciones de valle, pueden facilitar la acumulación de M.O.; igualmente, la vegetación puede generar diferencias en las características de los Andisoles en ecosistemas de páramo, especialmente asociadas con la M.O. y sus componentes, lo cual genera condiciones diferentes como suelos melánicos y fúlvicos (Nierop *et al.*, 2007). Es factible, por tanto, que las diferencias en las condiciones y en la susceptibilidad al fuego de los suelos entre posiciones de ladera y valle, estén asociadas también a la vegetación que tiende a ser diferente entre ellas, con predominio de gramíneas en los valles. De otro lado, la M.O. puede incidir tanto en la severidad del incendio (Certini, 2005) asociada con una mayor disponibilidad de material para combustión, o incidir en la dinámica mineralógica al evitar la conversión de algunos minerales (Ketterings *et al.*, 2000).

El Al, que es una de las principales fuentes de acidez en los suelos tropicales (Fassbender y Bornemisza, 1994; Sánchez, 1981), no mostró una relación definida con el pH, siendo mayor en las zonas afectadas

y más bajo en las no-afectadas. Con relación a la posición en el relieve, este elemento tendió a ser más bajo en la posición valle, donde se observó un incremento más fuerte inmediatamente después del incendio, en el 2006. Los valores de saturación de Al son altos y en su mayoría  $> 30\%$ , lo que muestra condiciones de alta acidez y concentración de este elemento en el complejo de cambio. Los valores fueron más altos para la posición de ladera, no obstante los cambios más severos se presentaron en la posición de valles. Esto se asocia probablemente con la disminución en la concentración de las bases, lo que hace más importante el peso del Al en el complejo de cambio del suelo. Los resultados son consistentes con estudios realizados en Ecuador en condiciones de páramo, donde, dependiendo de la disponibilidad de Al, el carbono orgánico estable alcanzó concentraciones superiores a 20% en complejos con Al y Fe (Podwojewski, 2006).

El calentamiento debido al fuego puede generar deshidroxilación de algunos minerales arcillosos y como resultado aumentar la concentración de Al, Si y Fe, aunque simultáneamente las cenizas pueden generar un incremento en el pH y en los cationes de cambio. Posteriormente, se puede presentar rehidroxilación de los minerales, lo que nuevamente altera considerablemente la dinámica química del suelo (Yusiharni y Gilkes 2010).

En el páramo, los suelos están dominados por complejos órgano-minerales, más que por alófana. No obstante, la presencia de Al libre no es una condición necesaria para la acumulación de carbono orgánico, ya que ésta se encuentra relacionada con el clima frío y húmedo y la altura, así como con la topografía local en posiciones convexas con arroyos cercanos (Buytaert *et al.*, 2006b).

En general, los cationes que conforman las bases en el suelo (K, Ca, Mg y Na) tendieron a ser más altos ( $P < 0.05$ ) en las áreas no-afectadas por el incendio, y aunque la tendencia es a decrecer en las áreas afectadas, su nivel parece mantenerse estable. Este efecto fue más marcado en la posición valle, donde ocurrió una reducción a menos de 30% con respecto al valor inicial (de 18.5 cmol/

kg a 2.1 cmol<sub>c</sub>/kg) (Cuadro 4). La C.I.C. está definida, en este caso, especialmente por la M.O. y la salida de cationes como K, Ca, Mg y Na del complejo de cambio, haciendo más relevante el Al y aumentando la posibilidad de que los suelos sean más ácidos debido a la presencia de este elemento. Lo anterior se evidencia en la correlación significativa ( $P < 0.05$ ) hallada entre la M.O. y cada una de las bases; así como con Al, pero de manera inversa.

Se sabe que eventos de fuego en ecosistemas forestales pueden modificar drásticamente la estructura de las arcillas y por ende su mineralogía. Esta alteración es más evidente cerca de la superficie del suelo (Reynard-Callanan *et al.*, 2010). En este estudio no se hicieron análisis mineralógicos, no obstante es importante anotar que debido a la baja temperatura, la consecuente acumulación de M.O. y los constantes aportes

de cenizas volcánicas a través de la historia en los páramos (Buytaert *et al.*, 2006a), la presencia de minerales arcillosos puede ser muy incipiente y por tanto menos importante en las características predominantes en los suelos.

La abundancia de ácidos orgánicos y el pH ácido favorecen la formación de complejos con Al e impiden su incorporación a materiales amorfos como la alófana o la imogolita (Buytaert *et al.*, 2006a). La génesis de estos materiales amorfos, que posteriormente podrían dar origen a otros minerales arcillosos, es limitada por la M.O. que representa también en este caso un factor muy relevante en la génesis de los suelos de páramo.

El P, uno de los elementos más dinámicos en el suelo después de eventos como los incendios, mostró un comportamiento distinto de acuerdo con la posición en el relieve. Para las posiciones de valle se observó

**Cuadro 4.** Cambios en el aluminio (Al) y bases del suelo entre 0 y 25 cm de profundidad en sitios de valle y ladera después de un incendio en ecosistema de páramo.

Variable		Valle				Ladera			
		NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)	NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)
Al (cmol/kg)	Prom.	0.17c	1.10bc	1.30ab	1.29ab	1.20bc	1.15bc	1.67ab	1.66ab
	D.E.	0.06	1.31	0.48	0.28	0.00	0.49	0.27	0.02
P (mg/kg)	Prom.	5.33bc	10.67abc	9.60b	2.22c	22.00a	16.00ab	12.10ab	1.89c
	D.E.	3.21	5.51	7.46	2.17	8.49	4.24	2.64	0.60
Ca (cmol/kg)	Prom.	11.37a	3.60b	1.62bc	1.61bc	1.30bc	1.05bc	0.72c	1.24bc
	D.E.	2.48	2.93	1.44	1.08	0.71	0.07	0.27	0.36
Mg (cmol/kg1)	Prom.	4.90a	1.10b	0.52bc	0.33bc	0.45bc	0.35bc	0.23c	0.24c
	D.E.	0.26	0.87	0.62	0.26	0.35	0.07	0.08	0.10
K (cmol/kg)	Prom.	1.54a	0.60b	0.16c	0.18c	0.27bc	0.44bc	0.24c	0.23c
	D.E.	0.51	0.26	0.04	0.04	0.21	0.09	0.06	0.10
CICE (cmol/kg)	Prom.	18.71a	6.50b	3.66c	3.41c	3.27bc	3.04bc	2.90c	3.39c
	D.E.	1.49	3.06	1.69	1.41	1.29	0.59	0.60	0.46
CIC (cmol/kg)	Prom.	73.0	27.0	19.5	19.3	16.5	17.5	19.1	18.4
	D.E.	11.5	7.5	2.7	3.7	4.9	3.5	2.8	4.0
BT (cmol/kg)	Prom.	18.54a	5.40b	2.36bc	2.12c	2.07bc	1.89bc	1.23c	1.72c
	D.E.	1.53	3.83	2.05	1.35	1.29	0.10	0.40	0.46
Sat. Al (%)	Prom.	0.90c	20.99bc	44.42b	41.82b	39.74bc	36.94bc	58.36a	49.85ab
	DE	0.35	24.86	22.91	13.38	15.65	9.07	5.67	6.28

NA\* = no-afectado, promedio años 2006 a 2009; CICE = capacidad de intercambio catiónico efectivo; CIC = Capacidad de intercambio catiónico total; BT = bases totales; S. Al = saturación de Al; D.E. = desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

una ligera tendencia a incrementar luego del incendio, lo que puede estar asociado con la mineralización de la M.O. en el momento de la quema. Sin embargo, se redujo para los años siguientes hasta llegar a su valor más bajo en el último año de monitoreo (2009). En las posiciones de ladera luego del incendio (2006) se observaron valores más altos de P que en las posiciones valle, no obstante el comportamiento fue totalmente decreciente y pasó de valores superiores a 20 mg/kg, en promedio, a menos de 5 mg/kg (Cuadro 4).

Los cambios observados en las propiedades químicas de los suelos son consistentes con los encontrados por Mils (2006), quien determinó que después de un incendio las propiedades que resultan más afectadas y muestran una mayor sensibilidad son la M.O. y la C.I.C., por lo cual pueden ser utilizadas como posibles indicadores de degradación del suelo.

### Cambios en las propiedades físicas del suelo

Cuando las variables se analizaron considerando la posición en el relieve y los años después del incendio, se observa que la D.A. fue menor ( $P < 0.05$ ) en las posiciones valle donde se evidenciaron los cambios más contrastantes. La tendencia fue a incrementar

luego del incendio con cambios más fuertes en 2006 y 2008.

El comportamiento de la D.A. respondió a los cambios mostrados en la M.O., siendo más alta ( $P < 0.05$ ) a medida que la M.O. disminuyó, lo que se corrobora con el análisis de correlación ( $R = -0.66$ ). La densidad real (D.R.) presentó un comportamiento menos dinámico y solamente se observaron diferencias ( $P < 0.05$ ) en la posición de valle con suelos no-afectados, donde fue menor que en los demás sitios. La porosidad total presentó valores más altos ( $P < 0.05$ ) en las posiciones valle, con una tendencia decreciente después del incendio, equivalente a 17% menos entre 2006 y 2009. En la posición de ladera, el contraste fue menor, aunque también con tendencia decreciente (Cuadro 5).

La distribución de poros de acuerdo con su tamaño (macroporos, mesoporos y microporos), mostró cambios significativos ( $P < 0.05$ ) posteriores al incendio, especialmente los macroporos que influyen en el movimiento de agua por gravedad (Montenegro *et al.*, 1990). Estos fueron más abundantes ( $P < 0.05$ ) en las posiciones de ladera. Así mismo, en ambas posiciones se encontró una tendencia decreciente posterior al incendio, que se relacionó con la pérdida de espacio poroso en

**Cuadro 5.** Cambios en la densidad y el espacio aéreo del suelo entre 0 y 15 cm de profundidad en sitios valle y ladera, después de un incendio en un ecosistema de páramo.

Variable		Valle				Ladera			
		NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)	NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)
D.A. (g/cm <sup>3</sup> )	Prom.	0.11d	0.30c	0.58b	0.69ab	0.63abc	0.45c	0.70ab	0.73a
	D.E.	0.01	0.11	0.08	0.11	0.00	0.01	0.08	0.05
D.R. (g/cm <sup>3</sup> )	Prom.	1.81	2.36	2.34	2.41	2.39	2.33	2.39	2.36
	D.E.	0.15b	0.08a	0.0a4	0.05a	0.03a	0.03a	0.04a	0.03a
Pt (%)	Prom.	93.9ab	87.5bc	75.2cd	71.8de	73.6de	80.9c	71.0de	69.1e
	D.E.	0.7	4.1	3.5	4.4	0.4	0.3	3.4	1.9
Macroporos (%)	Prom.	12.71b	13.83b	13.13b	5.14c	18.75a	19.07a	14.20ab	8.68bc
	D.E.	3.54	1.33	3.54	2.25	0.82	1.23	5.87	2.55
Mesoporos (%)	Prom.	14.24abc	16.43ab	17.00ab	13.92abc	10.34bc	15.77ab	12.37bc	14.62ab
	D.E.	5.42	0.36	1.81	2.47	2.14	1.98	2.35	2.42
Microporos (%)	Prom.	52.38abc	56.45b	45.09c	52.71b	64.96a	42.73c	44.41c	45.79c
	D.E.	10.62	4.84	3.85	2.32	2.17	2.52	3.93	2.36

NA\* = no-afectado, promedio años 2006 al 2009; AF= afectado; DA = densidad aparente; DR = densidad real; Pt = porosidad total. DE = desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

el suelo y con el incremento de la D.A. Esta relación se confirmó con la correlación significativa ( $P < 0.05$ ) entre la macroporosidad y la D.A. ( $R = 0.4$ ). Un comportamiento similar se observó para los microporos, asociados con agua higroscópica (no-aprovechable), los cuales tendieron a decrecer después del incendio siendo una evidencia de pérdida del espacio poroso total del suelo y por tanto, una afectación de su capacidad de regulación hídrica (Cuadro 5).

Las excelentes propiedades físicas de los suelos en los páramos son responsables de su capacidad de regulación hídrica y, consecuentemente, del alto contenido de agua que se refleja en la humedad y la capacidad de almacenamiento, a pesar del porcentaje de agua más allá del punto de marchitez permanente no-disponible para las plantas (Buytaert *et al.*, 2006a) asociado con la microporosidad.

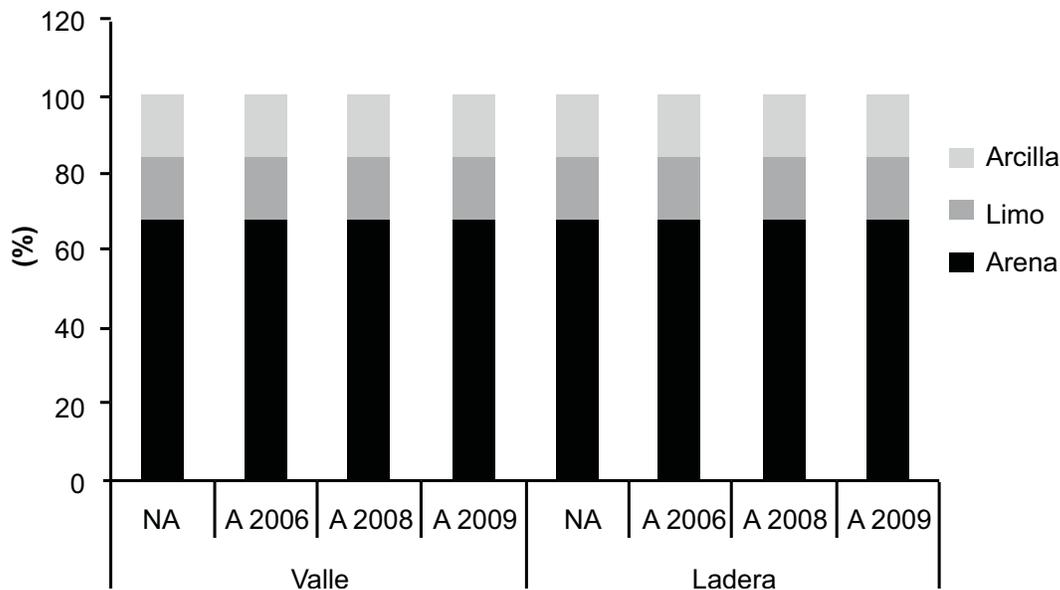
Es importante considerar que cuanto más antiguos sean los depósitos de cenizas volcánicas y más distantes a la actividad volcánica, existe un mayor grado de evolución del suelo. Esta evolución del suelo conlleva al desarrollo de epipedones melánicos con propiedades hidrológicas, donde la capacidad de almacenamiento, especialmente de microporos, puede alcanzar hasta 3000 g/kg. También su grado de evolución implica que cualquier

daño puede generar cambios irreversibles (Podwojewski, 2006).

Para la distribución de partículas por tamaño (textura) no se observaron diferencias ( $P > 0.05$ ) en los contenidos de arena, limo y arcilla, entre sitios afectados y no-afectados por el incendio. Se encontró predominio de partículas de arena (Figura 1) y por tanto de texturas gruesas, donde la M.O. es el elemento clave para la agregación de los suelos. De esta manera, la pérdida de M.O. implica una mayor susceptibilidad de la estructura al daño y a la erosión del suelo.

Los efectos más severos luego del fuego se observaron especialmente en la superficie del suelo donde las texturas tienden a ser más gruesas (Ketterings *et al.*, 2000). Por otra parte, el aumento de la temperatura puede incrementar la hidrofobicidad, reducir la capacidad del suelo de absorber agua y aumentar la susceptibilidad a la erosión (Certini, 2005).

La cantidad de agregados estables fue similar entre los sitios afectados y los no-afectados. Los agregados  $> 6.3$  mm fueron más abundantes ( $P < 0.05$ ) entre clases de tamaño y su predominancia fue mayor en los sitios no-afectados. Para la posición valle, estos agregados antes del incendio (sitio no-afectado) eran  $> 80\%$  y mostraban un valor significativamente más alto, luego este por-

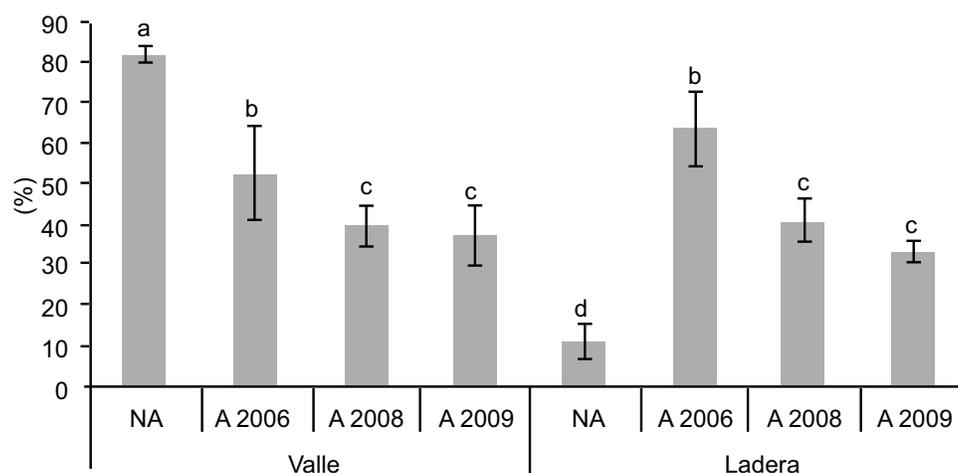


**Figura 1.** Distribución de partículas por tamaño (%) entre 0 y 15 cm de profundidad, para áreas afectadas y no-afectadas por el incendio de acuerdo con la posición en el relieve (valle o ladera). NA\* = no afectado, promedio años 2006 - 2009; A= afectado años 2006, 2008 y 2009.

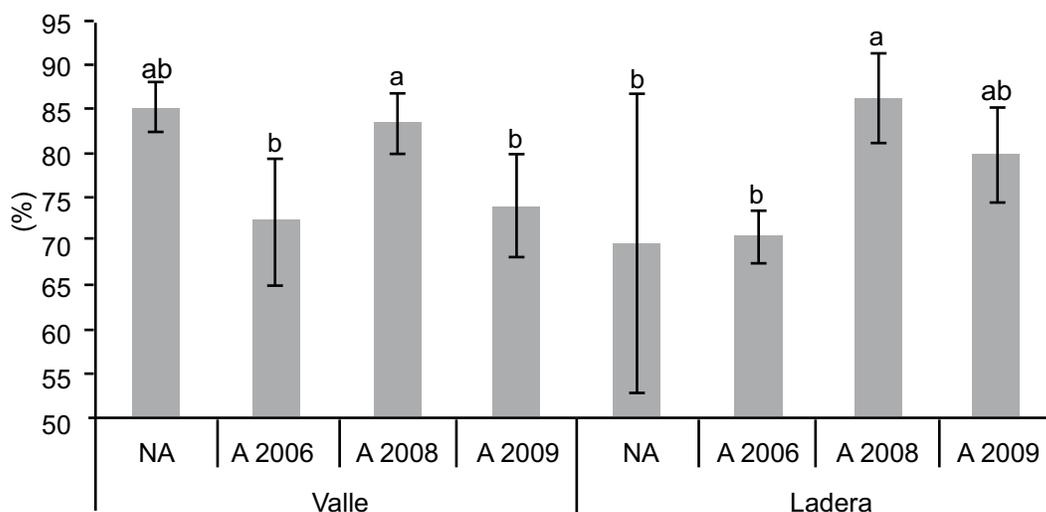
centaje decayó hasta cerca de la mitad (38%) en 2009 (Figura 2). En la posición ladera, los resultados mostraron en general menor cantidad de agregados en esta clase de tamaño (6.3 mm) y un incremento ( $P < 0.05$ ) posterior al incendio (de 10% para 63%). Luego el valor cayó hasta 33% y mostró en las últimas tres evaluaciones el mismo comportamiento decreciente que en las posiciones valle. La tendencia decreciente es una evidencia del deterioro de la estructura del suelo posterior al incendio, que como se mencionó previa-

mente, se relaciona con el aumento de la susceptibilidad del suelo a la erosión.

La prueba de estabilidad de agregados al agua corrobora la importancia de estos para la estructura del suelo, ya que a mayor tamaño y cantidad, mayor es su permanencia en el suelo. En las clases de tamaño más finas, el porcentaje de agregados estables fue considerablemente más bajo. Para esta variable se presentaron diferencias ( $P < 0.05$ ) entre los sitios analizados, no obstante no se observó una tendencia definida (Figura 3).



**Figura 2.** Porcentaje de agregados con diámetro > 6.3 mm entre 0 y 15 cm de profundidad, para áreas afectadas y no-afectadas por el incendio, de acuerdo con la posición en el relieve (valle o ladera), años 2006, 2008 y 2009. NA\* = no afectado, promedio años 2006 - 2009; A= afectado años 2006, 2008 y 2009. Líneas verticales sobre las barras son desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).



**Figura 3.** Agregados con diámetro mayor a 2.4 mm estables al agua entre 0 y 15 cm de profundidad, para áreas afectadas y no afectadas por el incendio de acuerdo con la posición en el relieve (valle o ladera), años 2006, 2008 y 2009. NA\* = no-afectado, promedio años 2006 - 2009; A= afectado años 2006, 2008 y 2009. Líneas verticales sobre las barras son desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

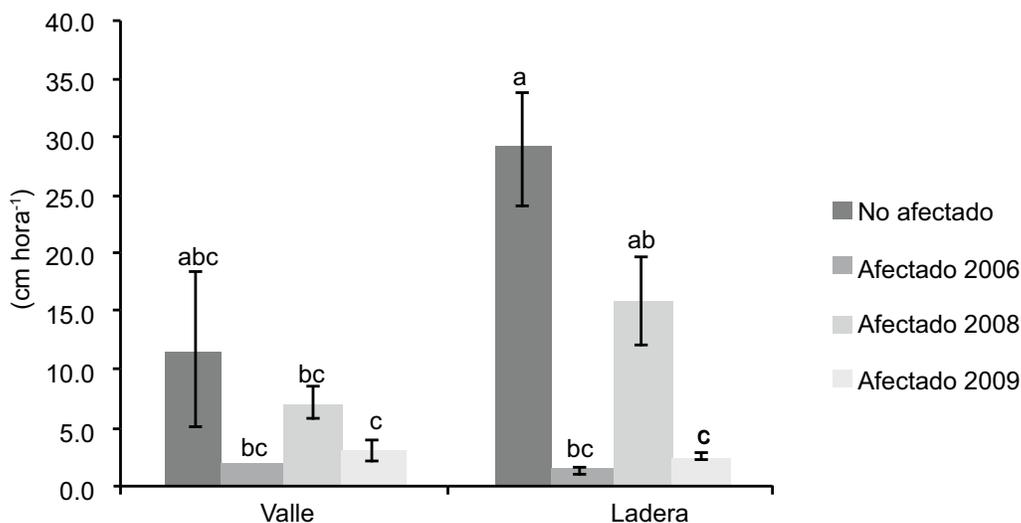
Según Vargas y Rivera-Ospina (1990) las quemas y el pastoreo generan cambios en la micro-topografía del suelo, lo que afecta el banco de semillas y su tasa de germinación. De esta manera, los procesos de restauración natural pueden ser más lentos y posiblemente no exitosos. Así mismo, la pérdida de cobertura puede generar erosión (Cárdenas *et al.*, 2002) que en condiciones de ecosistemas de páramo puede tener un efecto negativo para el suelo.

El deterioro del suelo fue igualmente evidente por la reducción de la conductividad hidráulica, la cual en promedio fue aproximadamente tres veces menor en condiciones afectadas por el incendio. Los valores fueron más altos ( $P < 0.05$ ) en los sitios de ladera no-afectados por el incendio, donde se observó una correlación significativa ( $P < 0.05$ ) con la cantidad de macroporos ( $R = 0.6$ ) presentes en este sitio. Después del incendio en ambas posiciones se encontró una reducción significativa ( $P < 0.05$ ) de la conductividad hidráulica, equivalente a 71% en posiciones valle y 91% en ladera (Figura 4). Esta tendencia fue confirmada por la reducción en la permeabilidad ( $P < 0.05$ ), especialmente en las tensiones más bajas (pF), siendo de 98% en la posición valle y de 92% ladera, con respecto al valor inicial. Cuando el espacio aéreo se reduce,

como en los sitios afectados por el incendio, a altas presiones puede ocurrir un mayor efecto de las fuerzas de tensión superficial del agua (Cuadro 6) y esto incide considerablemente en su flujo.

Los valores de humedades gravimétrica y volumétrica del suelo son indicativos de la alta capacidad de retención de agua. En el caso de la primera, de hecho los valores estuvieron por encima de 100% en las tensiones más bajas. No obstante, esta capacidad fue reducida ( $P < 0.05$ ) luego del incendio, especialmente en las posiciones valle (Cuadro 6).

La capacidad de almacenamiento del suelo estimada fue, en promedio, de 13% hasta 15 cm de profundidad, lo que equivale a 320 m<sup>3</sup>/ha; los valores variaron entre 10 y 20% del volumen total (208 m<sup>3</sup>/ha y 553 m<sup>3</sup>/ha). Aunque inicialmente ésta tendió a ser mayor ( $P < 0.05$ ) en las posiciones de ladera, después de 2006 en ambas posiciones los valores tendieron a decrecer. Es importante entender que en este caso se contabilizó el volumen que puede ser aprovechado, dada la tensión con que el agua es retenida por el suelo. Por tal razón, el agua retenida a tensiones muy altas (pF > 4.17) o muy bajas (pF < 1.8) no debe ser tenida en cuenta, siendo necesario considerar otras propiedades para concluir acerca de la capacidad hidrológica de estos suelos.



**Figura 4.** Conductividad hidráulica entre 0 y 15 cm de profundidad, para áreas afectadas y no afectadas por el incendio de acuerdo con la posición en el relieve (valle o ladera), años 2006, 2008 y 2009. Líneas verticales sobre las barras son desviación estándar. Letras distintas entre promedios son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

**Cuadro 6.** Cambios en el tiempo de la permeabilidad al aire, la humedad gravimétrica y la humedad volumétrica del suelo entre 0 y 15 cm de profundidad en sitios valle y ladera, después de un incendio en ecosistema de páramo.

Variable			Valle				Ladera				
			NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)	NA*	AF (2006)	AF (2008)	AF (2009)	
Permeabilidad al aire (cm/día)	pF = 1.87	Prom.	894.7	341.8	20.8	20.3	122.3	191.2	18.9	8.8	
		D.E.	48.8	132.9	23.6	27.3	2.6	6.1	9.7	2.8	
	pF = 3	Prom.	679.1	277.6	86.3	128.6	75.8	150.2	83.2	56.5	
		D.E.	34.5	102.6	67.0	110.6	4.1	1.0	17.2	29.0	
	pF = 4.17	Prom.	580.2	222.5	158.7	219.7	57.2	108.7	121.1	174.8	
		D.E.	45.8	73.8	68.1	178.6	0.9	6.1	26.7	75.1	
Humedad gravimétrica (%)	pF = 0	Prom.	894.7	341.8	167.2	135.8	122.3	191.2	123.2	109.6	
		D.E.	48.8	132.9	44.6	41.6	2.6	6.1	25.3	9.9	
	pF = 1.87	Prom.	679.1	277.6	126.8	112.7	75.8	150.2	87.0	85.5	
		D.E.	34.5	102.6	35.9	33.7	4.1	1.0	13.0	6.7	
	pF = 3	Prom.	627.3	240.2	108.6	97.6	68.7	124.9	73.0	74.3	
		D.E.	34.5	76.6	28.6	27.2	1.6	10.5	12.3	6.2	
	pF = 4.17	Prom.	580.2	222.5	92.5	89.3	57.2	108.7	68.3	64.3	
		D.E.	45.8	73.8	27.4	24.7	0.9	6.1	11.2	5.5	
	Humedad volumétrica (%)	pF = 0	Prom.	99.0	91.8	63.4	79.9	77.1	85.2	65.2	76.7
			D.E.	1.6	4.6	16.7	4.5	1.8	0.3	16.4	1.7
		pF = 1.87	Prom.	75.1	75.1	49.3	66.6	47.8	66.9	52.6	60.4
			D.E.	0.3	2.4	13.0	3.9	2.5	1.4	12.8	1.6
pF = 3		Prom.	69.4	65.9	42.2	57.6	43.3	55.7	43.7	52.6	
		D.E.	0.7	4.0	11.3	2.9	0.9	6.2	10.5	2.1	
pF = 4.17	Prom.	64.1	60.9	37.3	52.7	36.1	48.5	38.9	45.8		
	D.E.	2.1	3.8	10.4	2.3	0.6	4.1	9.3	2.4		

NA\* = no-afectado, promedio años 2006 - 2009; AF= afectado; pF = potencial hídrico del suelo.

El efecto del incendio en la zona Parque Nacional Natural de Los Nevados fue considerablemente negativo, lo cual es evidente en los cambios en las propiedades evaluadas y la vulnerabilidad del suelo a la degradación. Cuando se pierde la cobertura vegetal, las superficies desnudas se hacen altamente repelentes al agua, se incrementan la escorrentía, los agregados repelentes al agua flotan y aumenta la erosión, cambios que van acompañados de degradación de la estructura y pérdida de la M.O. (Podwojewski, 2006). La baja densidad encontrada en el estudio hace el suelo más susceptible a la erosión, debido a que sus partículas se hacen repelentes y flotan en el agua de escorrentía (Poulenard *et al.*, 2001).

### Conclusiones

- Uno de los efectos más graves sobre el recurso suelo después del incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados fue la pérdida de M.O. especialmente en la posición valle. Esta pérdida afectó considerablemente otras propiedades como la densidad aparente, la porosidad y la estructura del suelo, la conductividad hidráulica y la permeabilidad. Esta afectación se relaciona con una reducción considerable del servicio ecosistémico de la capacidad de retención de humedad del suelo y un aumento de la susceptibilidad a la erosión, lo que amenaza seriamente la provisión de dichos servicios a los pobladores de la

región del Eje Cafetero, principalmente a los habitantes de los municipios de Pereira y Dosquebradas.

- Los resultados de las estrategias de restauración realizadas no muestran evidencias aún en la recuperación del suelo, tres años después de haber ocurrido el evento. Lo anterior está relacionado con la severidad de los daños ocurridos y la dinámica lenta que tiene la vegetación en las condiciones ecológicas predominantes en esta zona y el poco tiempo para su consolidación. No obstante, se considera que estas estrategias deben seguir siendo promovidas y sus efectos monitoreados para establecer prioridades de manejo. A partir de los resultados obtenidos, se puede inferir que para el éxito de la restauración ecológica es importante el incremento de la cantidad de M.O., especialmente en las posiciones valle, ya que desde esta variable se generan mejores condiciones hidrológicas y menos susceptibilidad a la erosión. En este sentido priorizar estrategias de restauración que incrementen el porcentaje de esta materia podría ser lo más beneficioso para el recurso suelo.
- La información sobre páramos en general no es abundante y se encuentran pocos registros, razón por la cual es necesario profundizar en este tipo de investigaciones con el propósito de generar mejores criterios para la toma de decisiones. Con más tiempo y más recursos, sería posible obtener más información sobre la mineralogía de los suelos y de los distintos componentes de la M.O. y dar una mejor explicación a los efectos que generan los incendios en los páramos. No obstante, con los hallazgos en este estudio hay suficientes evidencias para evitar cualquier tipo de actividad que genere cambios en el suelo y en la cobertura vegetal de estos ecosistemas únicos, frágiles y altamente estratégicos.

### Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de los Proyectos: Determinación de los cambios ocurridos a las propiedades químicas y físicas de los suelos del sector de la Laguna del Otún

en el PNN Los Nevados, posteriores al incendio forestal de junio del 2006, financiado por CARDER, en el marco del convenio No. 040. Restauración del área afectada por el incendio forestal de julio de 2006, con participación del Comité Interinstitucional PNN Nevados, Cuenca Alta Río Otún, Departamento de Risaralda, mediante acuerdo 052 del 21 de noviembre de 2007, ejecutado por la CARDER y financiado por el Fondo Nacional de Regalías; Valoración de los Bienes y Servicios de la Biodiversidad para el Desarrollo Sostenible de Paisajes Rurales Colombianos: Complejo Ecorregional Andes del Norte, ejecutado por el CIEBREG y financiado por Colciencias. Agradecimientos especiales a Érika Nadachowski de la CARDER, quien estuvo al frente de la ejecución de los proyectos apoyados por esta entidad; Jorge Lotero, director del Parque Nacional Natural de Los Nevados y todo su equipo de trabajo. A Giovanni Grajales, quien realizó todos los muestreos de suelo.

### Referencias

- Ballesteros, J. B.; Bernal, J. F.; Castrillón, W. F.; y Correa, A. 2002. Caracterización semicuantitativa de las sustancias húmicas de un acrudoxic melanodands mediamórfico isotérmico del municipio de Chinchiná - Caldas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ciencias Básicas, Rev. Científica 4:57 - 68.
- Buytaert, W.; Deckers, J.; y Wyseure, G. 2006a. Description and classification of nonallophanic Andosols in south ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorph.* 73:20 7- 221.
- Buytaert, W.; Deckers, J.; y Wyseure, G. 2006b. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *CATENA* 70 (2): 143-154.
- Buytaert, W.; Iñiguez, V.; y De Bièvre, B. 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecol. Manag.* 251:22 - 30.
- Cárdenas, C.; Posada, A.; y Vargas, O. 2002. Banco de semillas germinable de una comunidad vegetal de páramo húmedo sometida a quema y pastoreo. Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia. *Ecotrópicos* 15(1):51 - 60.
- Castaño, C. 2002. Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición hotspot y global climatic tensor. IDEAM, Bogotá. 387 p.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143(1):1 - 10.

- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. 1994. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 420 p.
- Ferrán M., A. 2001. SPSS para Windows Análisis estadístico. Madrid, España.
- Hedberg, O. 1992. Afroalpine vegetation compared to páramo: convergent adaptations and divergent differentiation. En: Balslev, H. y Luteyn, J. L. (eds.). Páramo: An andean ecosystem under human influence. Academic Press, Londres. p. 15 - 30.
- Hofstede, R. G. M.; Chilito-P., E. J.; y Sandovals, E. M. 1995. Vegetative structure, microclimate, and leaf growth of páramo tussock grass species, in undisturbed, burned and grazed conditions. *Vegetatio* 119:53 - 65.
- Hofstede, R.; Segarra, P.; y Mena, P. V. 2003. Los páramos del mundo. Global Peatland Initiative/ NC-IUCN/EcoCiencia, Quito. 299 p.
- Hofstede, R. G. M.; Groenendijk, J. P.; Coppus, R.; Fehse, J. C.; y Sevink, J. 2002. Impact of pine plantations on soils and vegetation in the ecuadorian high Andes. *Mountain Res. Dev.* 22:159 - 167.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1995. Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Bogotá. 632 p.
- Ketterings, Q. M.; Bigham, J. M.; y Laperche, V. 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1108 - 1117.
- Lotero, J. H.; Velasco, P.; Cardona, A.; y Castellanos, O. 2007. Recuperar el páramo. Restauración ecológica en la Laguna del Otún, PNN Los Nevados. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Parques Nacionales Naturales, Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER. 173 p.
- Lotero, J. H.; Trujillo, L. N.; Vargas, W. G.; y Castellanos, O. 2010. Restauración ecológica en páramos del Parque Nacional Natural Los Nevados. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Parques Nacionales Naturales. Bogotá. 148 p.
- Luteyn, J. L. 1992. Páramos: why study them? En: Balslev, H.; y Luteyn, J. L. (eds.). Páramo: an andean ecosystem under human influence. Academic Press, Londres. p. 1-14.
- Malagón, D. 2005. Los suelos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Colombia. 21 p.
- Mils, G. H. 2006. Impacto de la quema controlada sobre los principales parámetros químicos del suelo. En: Marca Liquida Agropecuaria. Sitios Argentinos de Producción Animal. p. 72 - 76.
- Montenegro, H.; Malagón, D.; y Guerrero, L. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Colombia. Subdirección Agrológica. 813 p.
- Moreno, F. H. y Lara, W. 2003. Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: S. A. Orrego; J. I. Del Valle; y F. H. Moreno (eds.). Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Departamento de Ciencias Forestales. Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente. Bogotá D.C., Colombia.
- Nierop, K. G. J.; Tonneijck, F. H.; Jansen, B.; y Verstraten, J. M. 2007. Organic matter in volcanic ash soils under forest and páramo along an ecuadorian altitudinal transect. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71 (4):1119 - 1127.
- Podwojewski, P. 2006. Constituants et propriétés des sols pour une mise en usage Effets du changement d'usage sur les constituants et les propriétés des sols. Exemple des hautes terres d'altitudes ou páramos en Equateur. Dossier D'habilitation A Diriger Des Recherches CR1- IRD. UR 176 Solutionssols, Usage des terres, Dégradation, Réhabilitation. 104p.
- Poulenard, J.; Bartoli, F.; y Burtin, G. 2002. Shrinkage and drainage in aggregates of volcanic soils: a new approach combining mercury porosimetry and vacuum drying kinetics. *Eur. J. Soil Sci.* 53:563 - 574.
- Poulenard, J.; Podwojewski, P.; Janeau, J. L.; y Collinet, J. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45:185 - 207.
- Reynard-Callanan, J. R.; Pope, G. A.; Gorrington, M. L.; y Feng, H. 2010. Effects of high-intensity forest fires on soil clay mineralogy. *Phys. Geogr.* 31(5):407 - 422.
- Rondón, M.; Amézquita, E.; Díaz, E.; Chávez, L. F.; Paz, L.; y Chávez, J. 2002. Efecto de cambios en el uso del suelo sobre los almacenamientos de carbono y flujos de gases de efecto invernadero en áreas del páramo de Las Ánimas, Cauca, Colombia. En: Memorias Congreso Mundial de Páramos. Tomo I. Paipa, Colombia. p. 154 - 158.
- Sánchez, P. A. 1981. Suelos del Trópico: Características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica, 634 p.
- Schlegel, B; Gayoso, J.; y Guerra, J. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono

- en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. Proyecto FONDEF D98I1076. Valdivia, Chile. 15 p.
- Vargas, O. R. y Zuluaga, S., 1986. Clasificación y ordenación de comunidades vegetales de páramo. *Pérez-Arbeláezia* 1(2):125 - 143.
- Vargas, O. y Rivera-Ospina, D. 1990. El páramo: un ecosistema frágil. En Cuadernos de Agroindustria y Economía Rural No 25, segundo semestre. Universidad Javeriana. Bogotá. p. 145-163.
- Vargas, O.; Premauer, J.; y Cárdenas, C. 2002. Efecto del pastoreo sobre la estructura de la vegetación en un páramo húmedo de Colombia. *Ecotrópicos* 15 (1):35 - 50.
- Yusiharni, E. y Gilkes, R. J. 2010. Soil minerals recover after they are damaged by bushfires. In *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world*. Brisbane, Australia. p. 104 - 107.