Revista esprint Investigación

https://rei.esprint.tech
Vol. 5 N° 1, enero-junio 2026 (128-139)

ISSN: 2960-8317

Artículo de investigación

Cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la región andina de Ecuador

Changes in soil organic carbon content under different land uses in an andean páramo ecosystem of Ecuador

Carla Fernanda Silva Padilla*
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
carla.silva@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-2105-7263

María Fernanda Rivera Castillo
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
mfrivera@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-9038-6044

Diego Armando Damián Carrión
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
diego.damian@espoch.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-1545-7439

Marco Vinicio Rodríguez Llerena
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
mvrodriguez@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-2492-2969

***Correspondencia:**
carla.silva@unach.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Silva, C., Rivera, M., Damián, D., & Rodríguez, M. (2026). Cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la región andina de Ecuador. *Esprint Investigación, 5*(1), 128-139. https://doi.org/10.61347/ei.v5i1.239

Recibido: *11 de diciembre de 2025*
Aceptado: *14 de enero de 2026*
Publicado: *20 de enero de 2026*

Copyright: Derechos de autor 2026 Carla Fernanda Silva Padilla, María Fernanda Rivera Castillo, Diego Armando Damián Carrión, Marco Vinicio Rodríguez Llerena.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: Los páramos son ecosistemas estratégicos que proveen servicios ecosistémicos esenciales, entre los que destacan el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica. Sin embargo, en las últimas décadas han experimentado una reducción significativa de su extensión, principalmente debido a la expansión de las actividades agropecuarias, lo que resalta la necesidad de valorar integralmente sus funciones ecológicas y económicas. El objetivo del presente estudio fue evaluar los cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) bajo diferentes usos de la tierra en la zona alta de la quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua. Se evaluaron tres tipos de uso del suelo: páramo, pasto y cultivo. En cada tipo de uso se implementaron diez parcelas de 20 × 20 m. La profundidad para la recolección de las muestras de suelo fue de 0–30 cm. Los parámetros fisicoquímicos analizados incluyeron color, textura, estructura, humedad, conductividad eléctrica, test de NaF, densidad aparente, pH y carbono orgánico. El análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo en el ecosistema páramo mostró variaciones asociadas al cambio de uso de la tierra. Los suelos de páramo presentaron los mayores valores de humedad (50,81 %), menor densidad aparente (1,17 g cm^{-3}) y pH moderadamente ácido (5,76–5,98), condiciones favorables para la acumulación de carbono orgánico del suelo, con una media de 3,5 %. En contraste, los suelos bajo cultivo mostraron menor humedad (29,98 %), mayor densidad aparente (1,26 g cm^{-3}) y menor contenido de COS (2,24 %), con diferencias significativas entre usos ($p = 0,006$). En consecuencia, los páramos desempeñan un papel clave en la mitigación del cambio climático, lo que subraya la importancia de su conservación y manejo sostenible.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, degradación, páramo, propiedades fisicoquímicas.

Abstract: *Páramo ecosystems are strategic environments that provide essential ecosystem services, among which carbon storage and water regulation stand out. However, in recent decades they have experienced a significant reduction in their extent, mainly due to the expansion of agricultural activities, highlighting the need to comprehensively assess their ecological and economic functions. The objective of this study was to evaluate changes in soil organic carbon (SOC) content under different land-use types in the upper zone of the Hualcanga stream, Igualata páramo, Tungurahua Province. Three land-use types were evaluated: páramo, pasture, and cropland. In each land-use type, ten 20 × 20 m plots were established. Soil samples were collected at a depth of 0–30 cm. The physicochemical parameters analyzed included color, texture, structure, moisture content, electrical conductivity, the NaF test, bulk density, pH, and organic carbon. The analysis of soil physicochemical properties in the páramo ecosystem showed variations associated with land-use change. Páramo soils exhibited the highest moisture values (50.81%), lower bulk density (1.17 g cm^{-3}), and moderately acidic pH (5.76–5.98), conditions favorable for soil organic carbon accumulation, with a mean value of 3.5%. In contrast, soils under cropland showed lower moisture (29.98%), higher bulk density (1.26 g cm^{-3}), and lower SOC content (2.24%), with significant differences among land-use types ($p = 0.006$). Consequently, páramo ecosystems play a key role in climate change mitigation, underscoring the importance of their conservation and sustainable management.*

Keywords*: Degradation, land-use change, páramo, physicochemical properties.*

1. Introducción

Los páramos son ecosistemas únicos y en América se extienden desde Costa Rica hasta los Andes tropicales de Colombia, Ecuador, Venezuela y Perú. En Ecuador, ocupan un área de 1 833 834 hectáreas, lo que equivale aproximadamente al 5 % del territorio nacional. Estos ecosistemas albergan una gran diversidad de especies de flora y fauna y funcionan como importantes reservorios de carbono en el suelo, por lo que son claves para la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad ambiental de la región altoandina (García et al., 2019). Además, actúan como esponjas naturales, ya que captan y almacenan agua, la cual es liberada gradualmente hacia ríos y acuíferos, garantizando un flujo constante durante todo el año.

En nuestro país, los páramos pueden almacenar hasta 230 toneladas de carbono por hectárea, lo que constituye un indicador positivo en la lucha contra el cambio climático (Hofstede et al., 2014). El páramo del Igualata no escapa a esta realidad, ya que proporciona servicios ecosistémicos clave, como el secuestro de carbono y la regulación hídrica, esta última de gran relevancia para las comunidades asentadas en la parte baja de la microcuenca, puesto que dependen de este recurso tanto para el consumo humano como para las actividades agrícolas (Farley et al., 2011).

Sin embargo, a lo largo del tiempo, los ecosistemas de páramo han ido perdiendo parte de su área debido a la expansión de la frontera agropecuaria y a la implementación de prácticas de reforestación inadecuadas, particularmente por la introducción de especies exóticas como el pino (Pinus radiata L.) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Rosero, 2020). Estos cambios en el uso de la tierra representan uno de los principales factores que inciden en la dinámica del carbono del suelo, elemento clave para el equilibrio del ecosistema y la provisión de servicios ecosistémicos (Hurtado-Naranjo et al., 2023).

Por otro lado, estas transformaciones reducen la cobertura vegetal nativa, así como alteran las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, afectando los procesos de acumulación, estabilización y liberación de carbono orgánico (CO); este último proceso contribuye de manera significativa al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Mogollón et al., 2010).

En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar los cambios en el contenido de CO del suelo bajo diferentes usos de la tierra, lo cual resulta fundamental para comprender los impactos del manejo del suelo, así como para generar iniciativas que contribuyan a la conservación del ecosistema páramo, con la finalidad de disminuir el avance de la frontera agropecuaria y fortalecer las estrategias de mitigación y adaptación frente a los efectos del cambio climático (European Commission – International Partnerships, 2025).

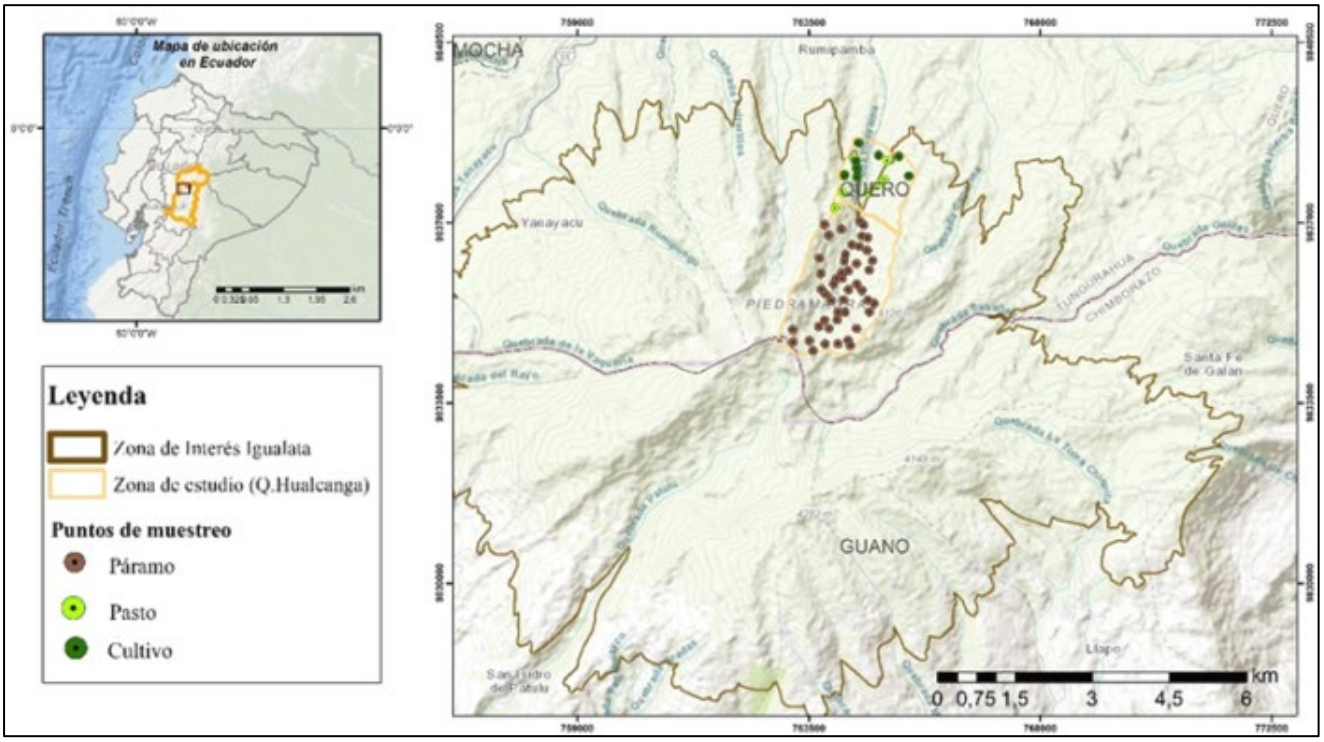
2. Materiales y métodos

Área de estudio

El cerro Igualata se localiza en las provincias de Tungurahua y Chimborazo (figura 1), en las coordenadas X = 762 958,73; Y = 9 833 493,06. Se extiende por los cantones Quero, Mocha y Guano. Su altitud varía desde los 3 600 m s. n. m. hasta los 4 400 m s. n. m., y abarca un área de 11 938,38 hectáreas. El área de estudio de la presente investigación se localizó en la zona alta de la quebrada Hualcanga, comprendiendo únicamente la provincia de Tungurahua, la cual posee una extensión de 6 957,2 ha.

Figura 1

Área de estudio (zona alta de la quebrada Hualcanga, páramo Igualata)



Puntos de muestreo

Para la obtención de los puntos de muestreo, se elaboró un mapa de la zona de estudio mediante el programa ArcGIS, con base en los tipos de uso de suelo: páramo, pasto y cultivo.

Diseño experimental

En la presente investigación se aplicó un diseño de bloques completamente al azar con diez repeticiones, donde los tratamientos correspondieron a los diferentes tipos de cobertura vegetal: páramo, pasto y cultivo. Los diferentes usos de suelo se localizaron en una misma unidad taxonómica, perteneciente al orden Andosol.

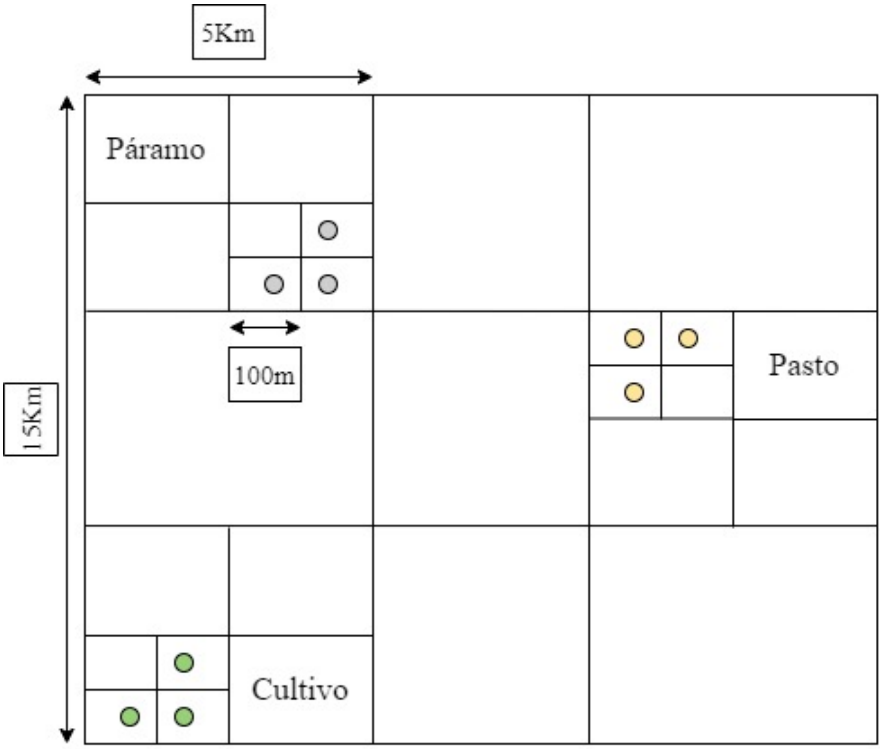
Muestreo de campo

Las muestras de suelo fueron recolectadas en parcelas de 20 × 20 m (figura 2), en cada uno de los diferentes usos de suelo: páramo, pasto y cultivo. En cada parcela se establecieron cinco puntos de muestreo, distribuidos uno en el centro y uno en cada uno de los cuatro vértices. Posteriormente, las submuestras fueron mezcladas para conformar una muestra compuesta (extracción de varias submuestras del mismo volumen y profundidad). Las muestras de suelo se recolectaron a una profundidad de 0–30 cm.

En el punto central de cada parcela se realizó la prueba de fluoruro de sodio (NaF), la cual permitió verificar que el suelo correspondía al orden Andosol. Además, se observó el color del suelo en condiciones naturales de humedad, el cual fue comparado con la tabla de colores de suelo Munsell. Para determinar la densidad aparente, se recolectó suelo mediante un cilindro de volumen conocido (FAO, 2015).

Figura 2

Muestras de suelo



Caracterización del suelo

De acuerdo con la Guía para la descripción de suelos de la FAO (2015), se caracterizaron los siguientes parámetros: pH, color, textura, estructura, test de NaF, densidad aparente, materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO).

pH del Suelo

El pH del suelo expresó la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo. Para su medición, se preparó una suspensión con 10 g de suelo y 25 mL de agua destilada (relación 1:2,5), la cual se agitó durante 30 min. Posteriormente, se realizó la lectura del sobrenadante sin agitar mediante un pH-metro (FAO, 2017). La misma solución se utilizó para medir la conductividad eléctrica (CE), expresada en $dS \cdot m^{-1}$.

Color

La determinación del color se realizó mediante el diagnóstico de matiz, valor y croma, utilizando la tabla de colores de suelo Munsell. Las lecturas se registraron tanto en suelo seco como húmedo, para cada uno de los diferentes estratos (Castro & Tapuy, 2023).

Densidad Aparente

El cálculo de la densidad aparente (Dap) se realizó mediante el método del cilindro de volumen conocido, sin disturbar la estructura natural del suelo (Ecuación 1). Este método consistió en extraer

una muestra de suelo in situ dentro del cilindro, a una profundidad de 0–30 cm. Las muestras fueron colocadas en fundas plásticas tipo ziploc, previamente etiquetadas, para su traslado al laboratorio. En el laboratorio, las muestras fueron pesadas, secadas en estufa a 105 °C durante 24 h y pesadas nuevamente para obtener el peso seco (Marín, 2017).

$$Dap\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{Pss}{Vc} \quad \text{(Ec. 1)}$$

Donde: Dap es la densidad aparente; Pss es el peso del suelo seco (g) y Vc es el volumen del cilindro (cm^3).

Test de NaF

La prueba de NaF se utilizó para determinar la presencia de aluminosilicatos. Para ello, se colocó una pequeña muestra de suelo sobre papel absorbente y se añadieron de 2 a 3 gotas de fluoruro de sodio y la misma cantidad de fenolftaleína. Cuando se detectaron aluminosilicatos disueltos, la muestra adquirió una coloración violeta (FAO, 2017).

Materia Orgánica y carbono orgánico del suelo

La materia orgánica (MO) se determinó mediante el método de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI). Previamente, todas las muestras fueron secadas al aire y tamizadas con una malla de 2 mm. Para la cuantificación del carbono orgánico, se utilizó el método descrito por Chambers et al. (2011) e Isaza et al. (2009), siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se introdujo la muestra de suelo en una estufa a 105 °C durante 24 h.
- Se pesaron 5 g de suelo seco en un crisol.
- Se colocó el crisol en una mufla a 550 °C durante 4 h.
- Posteriormente, se transfirió a un desecador y, una vez enfriado, se registró el peso final.

El cálculo de la MO se realizó mediante la diferencia de pesos, de acuerdo con la siguiente fórmula (ecuación 2):

$$\%\ \text{MO} = \frac{\text{Peso del suelo (5g) - peso después de la ignición}}{\text{Peso del suelo (5g)}} \quad \text{(Ec. 2)}$$

El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se estimó a partir del porcentaje de MO, utilizando el factor empírico de Van Bemmelen (1,724), el cual se basa en la suposición de que la MO del suelo contiene un 58 % de carbono (ecuación 3).

$$\%\ \text{COS} = \frac{\%\ \text{MO}}{1{,}724} \quad \text{(Ec. 3)}$$

3. Resultados

El análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo constituye una herramienta fundamental para conocer el estado actual del suelo y las posibles afectaciones que este sufre por el cambio de uso del suelo. Un suelo en su estado natural, como el páramo, se caracteriza por presentar altos contenidos de materia orgánica (MO), buena retención de agua y baja densidad aparente (Dap), condiciones que favorecen la regulación hídrica de la microcuenca. Sin embargo, la conversión del páramo hacia otros usos modifica de manera significativa las propiedades del suelo, alterando su ciclo natural de desarrollo y la dinámica de los procesos biogeoquímicos. En este contexto, la evaluación de los parámetros fisicoquímicos bajo diferentes usos permitió identificar los impactos ocasionados por las actividades antrópicas, generando información fiable sobre los procesos de degradación o conservación del suelo (tabla 1).

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos de suelo del páramo de Igualata

ID	Código	Uso de suelo	Color	Textura	Estructura	Humedad (%)	CE (dS·m⁻¹)	Test de NaF	
								++	++++
1	QHVI - 01	Páramo	10YR 2/1	Franco arenoso	Granular	33,39	30,67	x	
2	QHVI - 02	Páramo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	40,40	22,00		x
3	QHVI - 03	Páramo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	60,62	101,33		x
4	QHVI - 04	Páramo	10YR 2/1	Franco arenoso	Granular	52,16	20,33		x
5	QHVI - 05	Páramo	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	32,07	16,33		x
6	QHVI - 06	Páramo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	34,16	34,33		x
7	QHVI - 07	Páramo	10YR3/2	Franco arenoso	Granular	35,73	19,00		x
8	QHVI - 08	Páramo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	35,06	12,67		x
9	QHVI - 09	Páramo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	33,43	7,67		x
10	QHVI - 10	Páramo	10YR 2/2	Arenoso franco	Granular	33,44	7,67		x
11	QHPs - 01	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	26,51	44,00		x
12	QHPs - 02	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	27,18	45,67		x
13	QHPs - 03	Pasto	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	24,65	43,00		x
14	QHPs - 04	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	36,43	35,67		x
15	QHPs - 05	Pasto	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	34,01	28,33		x
16	QHPs - 06	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	30,67	33,67		x
17	QHPs - 07	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	28,58	55,00		x
18	QHPs - 08	Pasto	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	22,29	61,33	x	
19	QHCu - 01	Cultivo	10YR 2/1	Franco arenoso	Granular	25,33	68,67	x	
20	QHCu - 02	Cultivo	10YR 3/1	Franco arenoso	Granular	24,58	191,67	x	
21	QHCu - 03	Cultivo	10YR 2/2	Arenoso franco	Granular	29,70	87,00	x	
22	QHCu - 04	Cultivo	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	24,44	114,00	x	
23	QHCu - 05	Cultivo	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	14,68	43,67	x	
24	QHCu - 06	Cultivo	10YR 3/1	Arenoso franco	Granular	18,70	62,33		x
25	QHCu - 07	Cultivo	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	28,63	127,33	x	
26	QHCu - 08	Cultivo	10YR 2/1	Arenoso franco	Granular	12,90	79,67	x	

Nota. Los parámetros fueron obtenidos a partir de muestras de suelo del páramo del Igualata, con análisis realizados en laboratorio. El pH se determinó en solución acuosa y la conductividad eléctrica (CE) se expresa en dS·m⁻¹.

Color

El color del suelo en los diferentes usos de suelo (páramo, pasto y cultivo) se ubicó en el matiz 10YR. En páramo y pasto, la luminosidad osciló entre 3 y 4, con cromas de 1 a 2, lo que corresponde a tonalidades de gris muy oscuro a marrón grisáceo oscuro. En contraste, los suelos de cultivo presentaron una luminosidad menor en estado húmedo y mayor en estado seco, con croma 1 en ambos casos, reflejando colores de negro a grisáceo oscuro. Estas tonalidades indican una elevada presencia de materia orgánica, asociada principalmente a la acumulación de residuos vegetales y a un proceso lento de descomposición típico de ecosistemas de alta montaña (FAO, 2015).

Textura

En la capa superficial del suelo (0–30 cm), la textura predominante fue franco arenoso–arcillosa. Esta clase textural, caracterizada por una proporción equilibrada de arena, limo y arcilla, favorece una adecuada retención de humedad y nutrientes, al tiempo que permite un drenaje moderado. La homogeneidad textural observada sugiere condiciones similares de formación del suelo, asociadas al origen volcánico del material parental presente en la zona de estudio (Camacho-Tamayo et al., 2017).

Estructura

La estructura del suelo fue de tipo granular en todos los usos de suelo. Este tipo de estructura es característico del horizonte superficial (Ah) y se asocia con una alta actividad biológica y un elevado contenido de materia orgánica. La estructura granular favorece la infiltración de agua, la aireación del suelo y el desarrollo radicular, lo que contribuye a una mejor calidad física del suelo (Ocampo et al., 2022).

Humedad

El contenido de humedad del suelo mostró diferencias significativas según el uso del suelo. El páramo presentó el mayor porcentaje de humedad (50,81 %), atribuible a su cobertura vegetal natural, condiciones climáticas frías y alta precipitación. En contraste, los suelos de cultivo registraron el menor contenido de humedad (29,98 %), lo que refleja una menor capacidad de retención de agua asociada al manejo agrícola y a la alteración de la estructura y materia orgánica del suelo (Yaguache, 2022).

Test de NaF

La prueba de NaF aplicada a las muestras de suelo evidenció que el 84 % presentó una reacción de moderada a fuerte intensidad. Este resultado confirma la presencia significativa de arcillas de tipo alófanas y complejos órgano–alumínicos, característicos de suelos de origen volcánico. En consecuencia, los suelos del área de estudio corresponden al orden Andisoles, lo que explica su elevada capacidad de retención de agua, alto contenido de MO y propiedades físicas favorables en la capa superficial (Sánchez & Rubiano, 2015).

Densidad aparente

La figura 3 muestra la distribución de la Dap del suelo (g cm^{-3}). Los valores medios registrados fueron de 1,17 g cm^{-3} en el páramo, 1,25 g cm^{-3} en pasto y 1,26 g cm^{-3} en cultivo, evidenciando un incremento gradual de la Dap asociado al cambio de uso del suelo. El análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,363$). La dispersión de los datos indicó una mayor variabilidad en el páramo en comparación con los usos intervenidos, mientras que los suelos bajo pasto y cultivo presentaron distribuciones más concentradas alrededor de sus valores medios (Ocampo et al., 2022).

pH

El pH del suelo se mantuvo dentro de un rango moderadamente ácido, con valores entre 5,76 y 5,98, con diferencias significativas entre los usos de suelo. No obstante, se observaron ligeras variaciones asociadas al

manejo del suelo (figura, 4). Los suelos de cultivo tendieron a presentar valores cercanos a la neutralidad debido a la aplicación de enmiendas calcáreas, mientras que los suelos de páramo mostraron mayor acidez, relacionada con la acumulación de materia orgánica y la liberación de ácidos orgánicos durante su descomposición. Esta mayor acidez ralentiza el proceso de descomposición de la materia orgánica y, como resultado, permite mantener una cantidad significativa de carbono almacenado en el suelo (Agropal, 2017). Esto concuerda con lo reportado por Llambí et al. (2012), quienes señalan que estos suelos se caracterizan por su acidez, atribuida principalmente a la presencia de iones hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}).

Figura 3

Densidad aparente del suelo

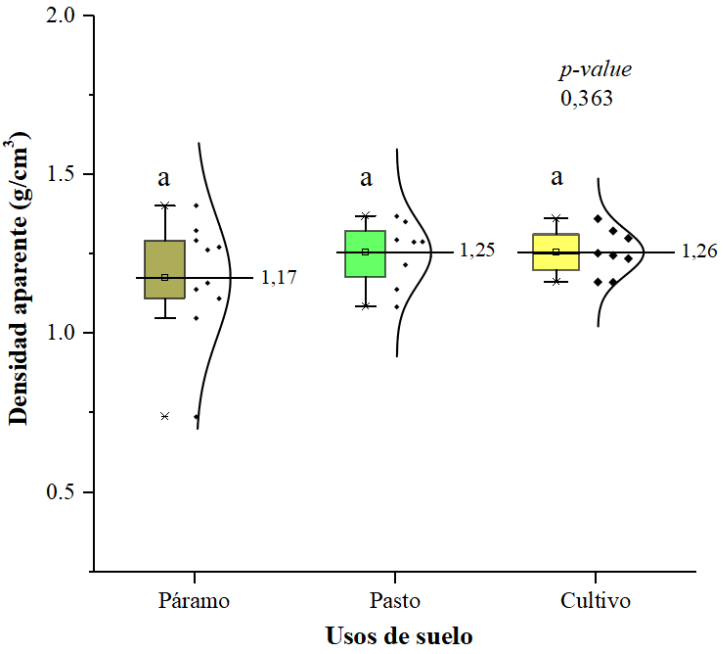
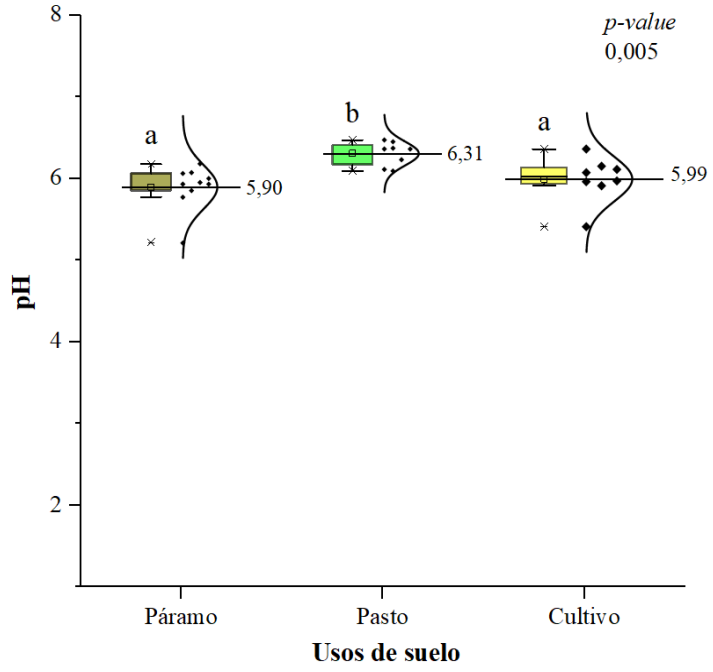


Figura 4

pH del suelo

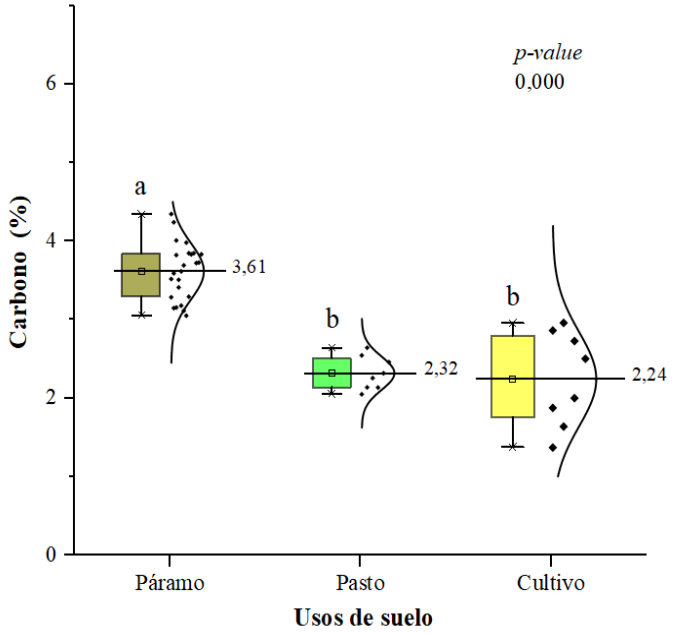


Carbono orgánico

La figura 5 muestra los valores de carbono orgánico del suelo (COS) obtenidos a una profundidad de 0–30 cm bajo cultivo, pasto y páramo, los cuales presentaron diferencias significativas (p = 0,006). El páramo presentó la mayor concentración de COS, con una media de 3,5 %, atribuida a una cobertura vegetal más densa y a una mayor protección de la capa superficial del suelo, lo que favorece la acumulación y preservación del carbono orgánico (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017). En contraste, los suelos bajo cultivo presentaron una menor concentración de COS, con una media de 2,24 %, debido a un menor aporte de biomasa subterránea y a una mayor exposición del suelo a procesos que aceleran la descomposición de la MO, dificultando la retención y acumulación de carbono (Zimmermann et al., 2010).

Figura 5

Contenido de carbono orgánico por uso de suelo.



4. Discusión

El contenido de carbono orgánico del suelo deriva directamente de la materia orgánica (MO) acumulada, la cual constituye uno de los factores más determinantes para el cálculo de la densidad aparente en suelos donde esta no ha sido medida directamente, seguida por las fracciones texturales de arcilla y limo, que también influyen aunque en menor magnitud (Jalabert et al., 2010). En este sentido, la relación entre MO, textura y densidad aparente resulta clave para interpretar la dinámica del carbono en suelos de ecosistemas altoandinos.

Al evaluar el carbono orgánico del suelo (COS) dentro del área de estudio, a una profundidad de 0–30 cm, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas (p = 0,000) entre los ecosistemas analizados, lo que indica que el uso del suelo ejerce una influencia directa sobre la capacidad de almacenamiento de carbono. Estas variaciones pueden explicarse principalmente por las diferencias climáticas, el tipo de cobertura vegetal y la tasa de descomposición de la materia orgánica, características propias de cada ecosistema evaluado.

Un estudio realizado por Hurtado-Naranjo et al. (2023) en el páramo de Sayaro, ubicado en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha, presenta resultados comparables y permite contextualizar los hallazgos de la presente investigación. En dicho estudio, el COS en páramo natural registró una media de 2,48%, valor inferior al 3,52% obtenido en el páramo del Igualata. De igual manera, en áreas de pastoreo reportaron un promedio de 1,74%, mientras que en este estudio se registró un valor superior de 2,77%. En contraste, para las zonas de cultivo, Hurtado-Naranjo et al. (2023) obtuvieron un valor de 2,94%, ligeramente mayor al 2,61% observado en este estudio, lo que sugiere diferencias en el grado de intervención y manejo del suelo.

Las variaciones observadas entre ambos estudios pueden atribuirse a condiciones ambientales y edáficas específicas, particularmente en el páramo de Sayaro, el cual se encuentra próximo al volcán Cayambe y presenta influencia directa de depósitos de ceniza volcánica y cobertura parcial de nieve. Estas características podrían acelerar los procesos de mineralización de la materia orgánica o limitar su acumulación, explicando así los menores contenidos de carbono en ciertas áreas reportadas por dichos autores.

Adicionalmente, de acuerdo con Llambí et al. (2012), los páramos de reciente formación presentan concentraciones de carbono orgánico que oscilan entre el 2% y el 10% (3,5–10 $kg \cdot m^{-2}$), valores que coinciden con los rangos obtenidos en el presente estudio. En este contexto, los resultados sugieren que el páramo del Igualata puede clasificarse como un ecosistema de páramo joven, con contenidos de carbono orgánico moderados en comparación con otros páramos andinos más antiguos o mejor conservados. No obstante, tanto las áreas naturales como aquellas sometidas a altos niveles de perturbación antrópica (cultivo y pasto) mantienen valores de COS dentro de los rangos reportados para este tipo de ecosistemas, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de manejo sostenible que eviten la pérdida progresiva de carbono del suelo.

5. Conclusiones

La transformación del ecosistema de páramo hacia otros usos del suelo, como el cultivo y el pastoreo, ha provocado alteraciones significativas en las propiedades del suelo, entre las que destacan la disminución del contenido de carbono orgánico (CO) y el incremento de la densidad aparente (Dap). Estos cambios se han intensificado progresivamente con el tiempo, contribuyendo al deterioro de la calidad física y química del suelo en las áreas intervenidas.

Los resultados evidencian que el suelo en su estado natural ejerce un papel determinante en la conservación del carbono orgánico, ya que los ecosistemas naturales, como el páramo, presentan concentraciones de CO superiores en comparación con los suelos destinados a pasto y cultivo. Esta tendencia se mantiene a lo largo del perfil del suelo, aunque se observa una disminución general del carbono orgánico con el aumento de la profundidad, lo cual es consistente con la menor acumulación de materia orgánica en los horizontes subsuperficiales.

En conjunto, los hallazgos confirman que el cambio de uso del suelo afecta negativamente la capacidad del páramo para almacenar carbono, lo que resalta la importancia de conservar estos ecosistemas y promover prácticas de manejo sostenible del suelo. La protección del páramo no solo contribuye a mantener la calidad y funcionalidad del suelo, sino que también desempeña un papel clave en la mitigación del cambio climático, al preservar uno de los principales reservorios de carbono de los ecosistemas altoandinos.

Referencias

Camacho-Tamayo, J., Forero-Cabrera, N., Ramírez-López, L., & Rubiano, Y. (2017). Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. *Colombia Forestal, 20*(1), 5–18. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01

Castañeda-Martín, A., & Montes-Pulido, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado, 13*(1), 210–221. https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112

Castro, J., & Tapuy, Y. (2023). *Efecto del cambio de uso del suelo de páramo a cultivo y pasto sobre fracciones orgánicas en la microcuenca Sicalpa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio DSpace – UNACH. http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10756

Chambers, F., Beilman, D., & Yu, Z. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. Mires and Peat, 7, 1–10. https://doi.org/10.19189/001c.128415

European Commission – International Partnerships. (2025). *Euroclima: Building a green and just transition with Latin America and the Caribbean*. International Partnerships. https://international-partnerships.ec.europa.eu/policies/global-gateway/euroclima_en

Farley, K., Anderson, W., Bremer, L., & Harden, C. (2011). Compensation for ecosystem services: An evaluation of efforts to achieve conservation and development in Ecuadorian páramo grasslands. *Environmental Conservation, 38*(4), 393–405. https://doi.org/10.1017/S037689291100049X

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). *Guía para la descripción de suelos*. FAO. https://www.fao.org/3/i3794es/I3794ES.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. FAO. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i6874es

García, V., Márquez, C., Isenhart, T., Rodríguez, M., Crespo, S., & Cifuentes, A. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon, 5*(10), e02701. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701

Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). *Los páramos andinos: ¿Qué sabemos? Estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-025.pdf

Hurtado-Naranjo, M., Alulema-Salto, R., & Palacios-Cabrera, T. (2023). Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 16*(2), 79–92. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9155357.pdf

Jalabert, S., Martin, M., Renaud, J., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., & Arrouays, D. (2013). Estimation of forest soil bulk density using boosted regression models. *Geoderma, 158*(3–4), 194–203. https://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x

Llambí, L., Soto-W., A., Célleri, R., de Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos andinos*. Proyecto Páramo Andino–FONAG. http://hdl.handle.net/10469/23897

Mogollón, J., Torres, D., & Martínez, A. (2010). Cambios en algunas propiedades biológicas del suelo según el uso de la tierra en el sector El Cebollal, Estado Falcón, Venezuela. *Bioagro, 22*(3), 217–222. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612010000300007

Ocampo, L., Osorio, W., Martínez, J., & Cabrer, K. (2022). La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de Megathyrsus maximus. *Acta Agronómica, 70*(4), 1–10. https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.88785

Rosero, C. (2020). *Estudio de vulnerabilidad a nivel de ecosistema de páramo frente al cambio climático en la zona de Pichán, comunidad Igualata, parroquia San Isidro, cantón Guano, provincia de Chimborazo* [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. https://www.dspace.espol.edu.ec/

Sánchez, J., & Rubiano, Y. (2015). Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *EIA, 12*, 1–13. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149240052008

Yaguache, L. (2022). Humedad y almacenamiento de agua en el suelo en cuatro tipos de cobertura vegetal. Ciencia Y Tecnología, 15(1), 19–24. https://doi.org/10.18779/cyt.v15i1.539

Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D., Bush, M., Feeley, K., Garcia, K., Dargie, G., Farfan, W., Goetz, B., Johnson, W., Kline, K., Modi, A. T., Rurau, N., Staudt, B., & Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems, 13*(1), 62–74. https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Carla Fernanda Silva Padilla: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

María Fernanda Rivera Castillo: Conceptualización, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Diego Armando Damián Carrión: Metodología, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Marco Vinicio Rodríguez Llerena: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.