Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 19, no. 37, enero-junio de 2025, páginas 27-34. DOI: https://doi.org/10.31908/19098367.3161.
ISSN 1909-8367 (Impreso), ISSN 2539-4169 (En línea)

Cantidad de carbono y otras propiedades en suelos de páramo y agrícola en Cundinamarca[1]

Carbon stock and other properties of paramo and agricultural soils from Cundinamarca

K.D. García, M.J. Calvo y C.S. Mosquera

Recibido: agosto 12 de 2024 – Aceptado: abril 24 de 2025

[1]***Resumen*—Los suelos son importantes para la captura de carbono y la mitigación del cambio climático. Esta investigación evaluó la cantidad de C y otras propiedades en un suelo de páramo y agrícola de Cundinamarca. Se determinaron propiedades fisicoquímicas, como densidad aparente, humedad, pH, CO, MO y la variación espacial de la cantidad de carbono. Además, se obtuvo un modelo matemático para estimar la cantidad de carbono fácilmente oxidable. El suelo agrícola presentó una mayor densidad aparente; mientras que el suelo de páramo mostró un mayor contenido de humedad, CO y MO. La cantidad de C del suelo de páramo y agrícola presentó una variación espacial con valores promedios de 93,74 ± 10,76 Mg/ha y 85,92 ± 9,34 Mg/ha, respectivamente, y el modelo matemático es válido estadísticamente solo para suelos de páramo, con un R^2 > 92%. Las actividades agrícolas y de conservación impactan la cantidad de C almacenado.**

***Palabras clave*—Cambio climático, carbón orgánico, propiedades fisicoquímicas.**

***Abstract*—Soils are important for carbon sequestration and climate change mitigation. This research evaluated the C stock and other properties in paramo and agricultural soils from Cundinamarca. Physicochemical properties such as bulk density, moisture, pH, OC, OM, and spatial variation of C stock were determined. Moreover, a mathematical model was used to estimate the amount of easily oxidizable carbon. The agricultural soil presented higher bulk density; meanwhile, the paramo soil showed higher moisture content, OC, and OM. The stock carbon in paramo and agricultural soils showed a spatial variation with average values of 93.74 ± 10.76 Mg/ha and 85.92 ± 9.34 Mg/ha, respectively, and the mathematical model is statistically valid only for paramo soil, with R^2 > 92%. Agricultural and conservation activities impact the amount of C stored.**

***Keywords*—Climate change, organic carbon, physico-chemical properties.**

I. Introducción

LOS suelos representan un importante reservorio de carbono (C) y su cantidad depende de su cobertura, las condiciones ambientales, los usos y el manejo del recurso [1]. Propiedades como la densidad, porosidad, pH, materia orgánica, entre otras, han sido alteradas principalmente para satisfacer la demanda de alimentos y fibras que tiene como principal impulsor el aumento de la población [2], lo que trae consigo la degradación física, química y biológica del suelo. Lo anterior genera una reducción significativa de la captura de C, aumento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y mayores consecuencias frente al cambio climático [3].

Con el fin de mitigar las emisiones de GEI, se han desarrollado diferentes estrategias en el ámbito global, tales como la firma del Acuerdo de París, en el año 2016, el cual busca limitar el aumento de la temperatura del planeta a menos de 1,5 °C. De este modo, se resalta que el almacenamiento de C en el suelo resulta tener varias ventajas que pueden hacerle frente a las diferentes problemáticas ambientales. Considerando el suelo un sumidero natural de CO_2, permite la recuperación de bosques y pastizales mediante la implementación de prácticas de manejo agrícolas sostenibles [4].

Contribuyendo con estas acciones, la FAO, para el 2021, presentó un manual técnico de buenas prácticas para capturar y mantener las reservas de C, así como un mapa en el que se

[1]Producto derivado del proyecto de investigación "Cantidad de carbono y otras propiedades en los suelos de Cundinamarca", apoyado por la Universidad ECCI y suscrito al programa de Pregrado en Ingeniería Ambiental.

K. D. García, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia, email: karold.garciar@ecci.edu.co.
M. J. Calvo, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia, email: calvo.maria@ecci.edu.co.
C. S. Mosquera, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, email: csmosquerav@unal.edu.co.

Como citar este artículo: García, K. D., Calvo, M. J., y Mosquera, C. M. Cantidad de carbono y otras propiedades en los suelos de Cundinamarca, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 19, no. 37, pp. 27-34, enero-junio 2025. DOI: https://doi.org/10.31908/19098367.3161.



Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC By-NC 4.0)

ilustra la cantidad de CO_2 que pueden capturar los suelos [5]. Estas son herramientas de apoyo para la toma de decisiones en el territorio, mitigar la degradación de los suelos y luchar contra el cambio climático.

En relación con la cantidad de C presente en los suelos, se han realizado diferentes investigaciones en sistemas de producción y zonas de conservación. Se ha encontrado entre 13,06 hasta 74,20 Mg/ha en sistemas agroforestales [6], [7]; 16,0 – 109,2 Mg/ha en sistemas productivos [6], [8]; y 28,05 - 108,0 Mg/ha en suelos de páramo [9], [10], [11]. Esta propiedad del suelo presenta una variación espacial y temporal, que depende de distintos factores y algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo [12]. [13] encontraron que la distribución del carbono orgánico del suelo (COS) está relacionada con la cobertura vegetal; por ejemplo, el área de arbustal denso presentó un menor contenido (137,7 Mg/ha), y la turbera, el mayor contenido (179,6 Mg/ha) de COS. También existe una relación espacial del carbón orgánico del suelo con el contenido de nutrientes (Ca, Mg, K, Cu y Zn) en cultivos de arroz, donde el Ca presentó una mayor asociación [14]. [15] indica que la relación va ligada con la calidad y fertilidad del suelo; los suelos vírgenes o en estado de conservación son los de mayor contenido de COS, y las zonas con intervenciones antrópicas, como la ganadería, presentan valores medios a bajos de C. El clima también es uno de los factores que se relaciona con el comportamiento de esta variable [12]. Para [16] el clima frío permite un mayor contenido de COS, mientras que en los climas cálidos hay un menor contenido. A través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se pueden predecir variables desconocidas para cualquier punto geográfico, lo que demuestra cambios históricos, actuales o futuros del contenido de C en el suelo [17].

La cantidad de C en el suelo se ha determinado a partir de métodos húmedos y secos. El método en húmedo Walkley & Black [18] está asociado al carbono de cadenas largas, como el humus fácilmente oxidable, y consiste en una digestión húmeda suave por oxidación con dicromato de potasio en medio ácido (H_2SO_4). Además, se lleva a cabo una valoración del dicromato de potasio que no reaccionó con el carbón fácilmente oxidable de los suelos, a través de una titulación con una solución de sulfato ferroso [19]. Las desventajas de este método están basadas en la utilización de grandes cantidades de ácido sulfúrico y la generación de residuos con presencia de Cr (III o VI), que es altamente cancerígeno. Sin embargo, es uno de los métodos más utilizados por su requerimiento mínimo de equipamiento, puede adaptarse para una gran cantidad de muestras y no es costoso [20]. El método de calcinación cuantifica la materia orgánica del suelo (MOS), y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas, pero si se quiere estimar el COS a partir de la MOS, se debe utilizar el factor Van Bemmelen [21]. Este es un método que ha sido propuesto como exacto en los resultados y de bajo costo; además, no requiere de agentes oxidantes y ácidos fuertes para la cuantificación de la materia orgánica presente en el suelo y es una alternativa más amigable con el ambiente [22]. Varios autores han encontrado que existe una correlación positiva entre ambos métodos, y se han obtenido relaciones lineales con R^2 entre 0,72 hasta 0,98 [20], [21], [22], [23].

La presente investigación tuvo como finalidad: i) establecer la variación espacial de la cantidad de C de un suelo agrícola y de páramo en los municipios de Sibaté y Soacha-Cundinamarca, Colombia; ii) establecer correlaciones entre la cantidad de carbono fácilmente oxidable y la densidad aparente, contenido volumétrico de agua y pH de los suelos, y iii) obtener un modelo matemático para estimar la cantidad de carbono fácilmente oxidable a partir de la calcinación de las muestras de suelo.

II. Metodología

A. Zona de estudio y muestreo de suelos.

El área de estudio se ubicó en el departamento de Cundinamarca, en los municipios de Sibaté y Soacha (Fig. 1).

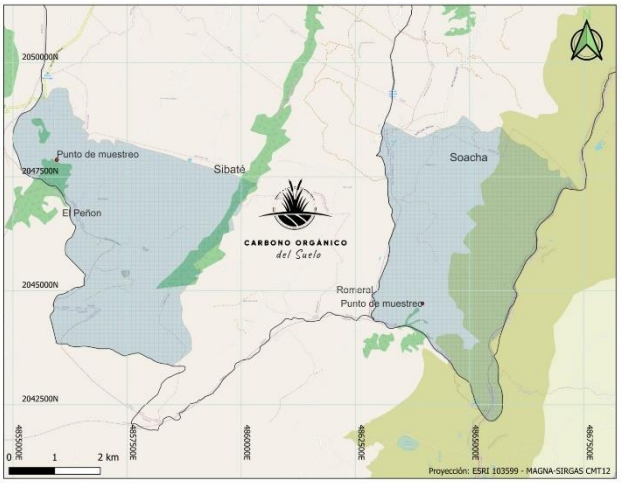


Fig. 1. Zona de estudio y muestreo de suelos.

Los suelos de estos municipios son principalmente Inceptisoles y Andisoles. El área de muestreo de Páramo se encuentra ubicada en Soacha y cuenta con una unidad cartográfica denominada MGTd, con un suelo Andisol profundo a superficial, con texturas moderadamente finas a gruesas, reacción muy fuerte a fuertemente ácida, alta a moderada saturación de aluminio y fertilidad baja a moderada. El suelo de uso agrícola está ubicado en Sibaté y tiene una unidad cartográfica MLSg con un suelo Inceptisol bien drenado, con texturas finas a gruesas y su fertilidad es en general alta [24].

Para la selección de los puntos de muestreo se escogieron 2 zonas distintas basadas en la intervención por actividades agrícolas y la no intervención del ecosistema.

La zona 1 (sin intervención; Fig. 2) está ubicada en el municipio de Soacha, el cual colinda con el Páramo de Sumapaz. Es un ecosistema de páramo (zona de conservación), el cual no ha sido intervenido por el hombre y presenta una vegetación conformada por frailejones, gramíneas, arbustos, musgos, líquenes, entre otras especies.

La zona 2 (intervenida, Fig. 3) está ubicada en el municipio de Sibaté, en un predio que por años ha sido intervenido por actividades agrícolas y ganaderas, como el cultivo de papa y pastoreo intensivo. En el momento del muestreo su uso principal era la ganadería junto con pastizales.



Fig. 2. Zona 1 – Ecosistema de Páramo.



Fig. 3. Zona 2 – Suelo de uso agrícola.

Se tomaron 40 muestras en total (20 para cada zona), con base en el diseño de muestreo de suelos propuesto por [1], ajustado a las características de ambas zonas. Las muestras de suelo se tomaron de manera aleatoria y sistemática, a una profundidad entre 0 a 10 cm, con anillos de 7,62 cm de diámetro interno y 10 cm de longitud.

B. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo.

A las muestras de suelo se les determinó la densidad aparente en húmedo y seco con el método del cilindro [25], el contenido volumétrico de agua en campo a través del método gravimétrico y la densidad aparente en seco [26], pH con una relación 1:3 y el método potenciométrico [27], contenido de carbono fácilmente oxidable con el método Walkley – Black [20], [28] y la materia orgánica a través del método en seco a 500 °C [21]. Por último, se calculó el contenido de carbono orgánico en mega gramos (Mg) por hectárea (ha) a partir de la ecuación sugerida por [29] y [30].

$$CO = DA * \%CO * Pm \quad (1)$$

Donde DA es la densidad aparente en g/cm^3, $\%CO$ es el porcentaje de carbón orgánico fácilmente oxidable y Pm la profundidad en cm. Además, se determinó la correlación lineal de Pearson entre el %CO y las demás propiedades del suelo y la comparación entre propiedades físicas y químicas de los 2 tipos de suelo se realizó a partir de las pruebas de Levene y T de student con un 95 % de confianza.

C. Variación espacial de la cantidad de carbono.

La variación espacial de la cantidad de carbono en el suelo agrícola y de páramo se estableció con el programa QGis, mediante el modelo de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW), en el que se estiman valores calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra. De este modo, la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear [31]. Los puntos de muestreo se establecieron de 1 a 40, donde 1 – 20 son suelo de páramo y 21 – 40 son suelo de uso agrícola. Al analizar las muestras espaciales se tuvo en cuenta la representatividad, sesgo e influencia. Dado que algunos puntos se encontraban fuera del área de interpolación, se decidió que la interpolación era confiable en un área máxima de 1 ha; por esta razón, se eliminaron datos que se encontraran fuera del área establecida [32].

D. Modelo matemático entre métodos para la cuantificación de materia orgánica en el suelo.

Con el fin de estimar el carbón fácilmente oxidable a partir del porcentaje de materia orgánica (MO) que se obtiene a través del método de calcinación, se estableció un modelo matemático de regresión lineal para el suelo de páramo, suelo agrícola y uno global con la información de ambos suelos. En el eje Y se tomaron los valores del carbón fácilmente oxidable %CO y en el eje X el %MO. En el modelo de regresión lineal se evaluó la correlación lineal (prueba de Fisher), distribución normal (prueba de Kolmogorov-Smirnov), independencia de los errores (prueba de Durbin Watson) y homogeneidad de varianzas (Prueba de Levene), con un 95 % de confianza.

Si los supuestos anteriormente nombrados se cumplen, se garantiza la validez del modelo de regresión lineal, lo que permite una correcta interpretación de los resultados. La verificación del modelo se realizó con 8 muestras (4 de páramo y suelo agrícola), las cuales se escogieron al azar y se les volvió a determinar el %CO y %MO. Con los resultados de %MO se obtuvo el %CO a partir del modelo matemático y se calculó el porcentaje de error relativo comparando los valores de %CO que se obtuvieron con el modelo y los valores experimentales.

III. Resultados y análisis

A. Propiedades físicas y químicas del suelo.

En la Tabla I se presentan los valores de las propiedades físicas y químicas que se evaluaron para el suelo del ecosistema de páramo y agrícola.

La densidad aparente (DA) en seco y húmedo fue estadísticamente diferente entre el suelo de páramo y agrícola; el suelo agrícola tiene una DA mayor a la del suelo de páramo (Tabla I). Para el caso de la DA en seco, en ambos tipos de suelo los valores están por debajo de la condición favorable (1,00 g/mL) [33], y valores entre 1,1 a 1,3 g/mL pueden causar daños a canales, ramales y sistemas de distribución agrícola [25]. Las actividades agrícolas y pecuarias en el suelo agrícola (zona 2) han incrementado la DA, lo que se traduce

en reducción del espacio poroso y compactación del recurso [25], [34].

La densidad aparente para el suelo de páramo mostró valores similares a los obtenidos por [10] y [35], quienes encontraron DA con valores mínimos de 0,10 Mg/m^3 y máximos de 1,46 Mg/m^3. Además, los valores que se obtuvieron en este estudio son acordes a las características del ecosistema; ya que, según [36], los suelos de montaña tienen una DA baja por sus altos contenidos de materia orgánica.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO DE PÁRAMO Y AGRÍCOLA.

Propiedades	Suelo de páramo	Suelo agrícola
	Valor	Valor
Densidad aparente en seco, Mg/m^3	0,43 ± 0,09	0,62 ± 0,06
Densidad aparente en húmedo, Mg/m^3	1,02 ± 0,08	1,11 ± 0,10
Humedad, %	147,71 ± 48,13	82,07 ± 9,74
pH	4,40 ± 0,21	5,54 ± 0,20
Materia Orgánica, %	37,22 ± 7,81	26,32 ± 2,33
Carbono Orgánico, %	22,88 ± 5,35	14,05 ± 1,29
Cantidad de CO, Mg/ha	93,74 ± 10,76	85,92 ± 9,34

El porcentaje de humedad entre el suelo de páramo y agrícola presentó diferencias significativas; tiene un mayor porcentaje el suelo de páramo comparado con el suelo agrícola (Tabla I). Debido a las condiciones climáticas (altura) y contenidos de materia orgánica, este tipo de suelo presenta mayor contenido de humedad, lo que favorece su función como regulador hídrico; por el contrario, dadas las actividades agrícolas y pecuarias a las que ha sido expuesto el suelo agrícola, disminuye su capacidad de retención de agua [37], [38].

El pH para ambos tipos de suelo fue estadísticamente diferente, teniendo un mayor pH el suelo de uso agrícola (Tabla I). En ambos tipos de suelo hay una condición desfavorable de esta propiedad desde el punto de vista químico; porque valores de pH ≤ 5,5 permiten la presencia de aluminio intercambiable [39]. El pH obtenido del suelo de Páramo se ajusta a la caracterización dada por algunos autores, la cual sugiere que este tipo de suelos tiene un pH entre 3,9 y 5,4; así, estos suelos son ácidos [38]. Para el caso del suelo agrícola, el pH se encuentra dentro de los rangos publicados por [40] (4,5 a 5,5) y [41] (4,5 a 6,0).

El porcentaje de MO y CO entre el suelo de páramo y agrícola fue estadísticamente diferente; el suelo de páramo tiene un mayor contenido de materia y carbón orgánicos fácilmente oxidable respecto al suelo agrícola (Tabla I). Ambos tipos de suelo cuentan con un valor alto de carbón orgánico [33], [39], lo que permite una buena actividad biológica del suelo. Sin embargo, la exposición a actividades agrícolas y pecuarias en el suelo agrícola han contribuido a la disminución de la cantidad de CO presente y demás propiedades nombradas anteriormente.

Los resultados obtenidos de MO y CO para ambos tipos de suelo son similares a los valores encontrados por [9] y [11], quienes estudiaron suelos en ecosistemas con y sin intervención; se encuentra una mayor cantidad de CO en la zona sin intervención. Al exponer los suelos a prácticas agrícolas y pecuarias, se afecta su calidad y se reduce su capacidad de almacenar C, por lo que es importante la implementación de prácticas sostenibles y amigables que permitan aumentar la capacidad de captura de C de los suelos, como la recuperación de bosques y pastizales, la implementación de prácticas de manejo agrícola, entre otras [4].

En la Tabla II se consignan los coeficientes de correlación de Pearson para el carbón fácilmente oxidable y las demás propiedades físicas y químicas de los suelos. Para el suelo de páramo, el %CO presentó una correlación negativa, con la densidad aparente en seco y una correlación positiva con el contenido volumétrico (95% de confianza), lo que indica que un incremento en el contenido de CO en el suelo permite una disminución en la DA e incremento de la humedad. Con las demás propiedades (densidad aparente en húmedo y pH) no se encontró ninguna correlación para ambos suelos.

TABLA II
CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE %CO Y LA DENSIDAD APARENTE, CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA, Y PH DE LOS SUELOS.

Propiedades	%CO suelo de páramo	%CO suelo agrícola
Densidad aparente en seco, Mg/m^3	r = - 0,83 Correlación fuerte	r = - 0,40 Correlación moderada
Densidad aparente en húmedo, Mg/m^3	r = - 0,16 No hay correlación	r = - 0,02 No hay correlación
Contenido volumétrico, m^3/m^3	r = 0,72 Correlación fuerte	r = 0,41 Correlación moderada
pH	r = 0,02 No hay correlación	r = - 0,11 No hay correlación

La correlación entre el %CO, la densidad aparente y el contenido volumétrico es acorde a lo analizado por [30], quienes establecieron una correlación negativa significativa entre el %CO y la DA. Además, los suelos ricos en materia orgánica tienen mayor porosidad y, por lo tanto, retienen un mayor volumen de agua; a medida que la densidad aparente aumenta, se reduce la porosidad del suelo y por lo tanto el contenido orgánico disminuye.

B. Variación espacial de la cantidad de carbono.

En la Fig. 4 y la Fig. 5 se presenta la variación espacial de la cantidad de CO en el suelo de páramo y de uso agrícola, respectivamente. La cantidad de carbono para el suelo de páramo (Fig. 4) presentó valores menores o iguales a 79,1 Mg/ha y mayores de 108,7 Mg/ha. Los valores para el suelo de uso agrícola (Fig. 5) fueron menores o iguales a 54,6 Mg/ha y mayores de 88,8 Mg/ha. Se observa una mayor cantidad de carbono en el ecosistema de páramo dadas sus condiciones de conservación y no intervención; por el contrario, en el suelo de uso agrícola se presenta una menor captura; ya que ha sido expuesto a manejos agrícolas y

pecuarios que alteran su cantidad de carbono [9], [11], lo que permite posiblemente una alteración en su calidad. La MOS ayuda a mejorar el hábitat de las plantas y la vida del suelo, contribuye a la estructura del suelo y a la capacidad de retención de agua, mejora la capacidad de intercambio catiónico y, por lo tanto, la capacidad de retener nutrientes y contaminantes, y es la base del secuestro de carbono del suelo [42].

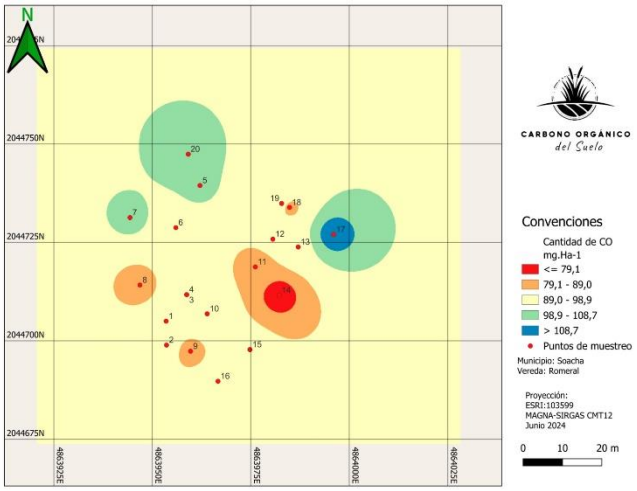


Fig. 4. Variación espacial de la cantidad de CO en el suelo de páramo.

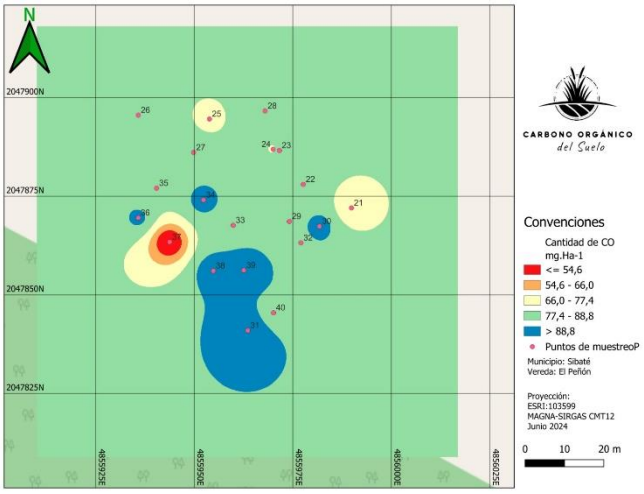


Fig. 5. Variación espacial de la cantidad de CO en el suelo agrícola.

Los puntos de muestreo con mayor cantidad de C en ambos tipos de suelo corresponden a las muestras que en laboratorio tuvieron presencia de macroorganismos como lombrices, chizas y cucarrones. Los micro- y macroorganismos tienen un papel importante en la cantidad de C del recurso, porque son los agentes de transformación de la materia orgánica, nutrientes y de la mayoría de los procesos clave que ocurren en el suelo [43]. Es importante caracterizar y conservar los organismos vivos del suelo con el fin de realizar una gestión adecuada en la conservación del carbono terrestre en condiciones de cambio climático.

C. Modelo matemático entre métodos para la cuantificación de materia orgánica en el suelo.

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan los modelos de regresión lineal entre los valores de %CO y %MO a 500ºC en el suelo del ecosistema de páramo, agrícola y ambos, respectivamente.

En el suelo de páramo se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,960, un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,923 un error típico de 1,51, y su verificación presentó un error relativo promedio de 6,61%. En el suelo agrícola el coeficiente de correlación fue de 0,887, el R^2 de 0,787; el error típico, de 0,613, y un error relativo promedio, de 12,44%. Con el modelo global, es decir, con la información de los 2 suelos, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,974, un R^2 de 0,950, un error típico de 1,33 y un error relativo de 7,85%.

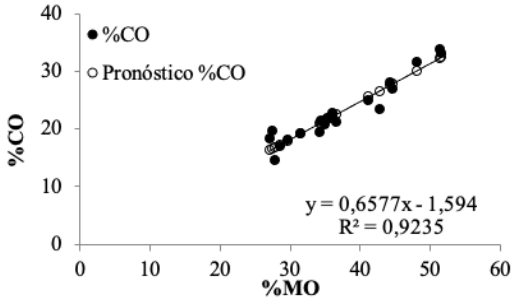


Fig. 6. Modelo A (páramo), modelo de regresión lineal entre el método en húmedo y seco para la determinación del contenido de materia orgánica del suelo.

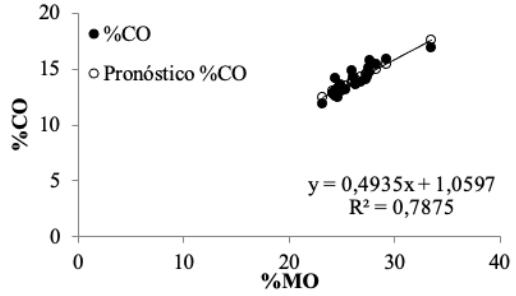


Fig. 7. Modelo B (agrícola), modelo de regresión lineal entre el método en húmedo y seco para la determinación del contenido de materia orgánica del suelo.

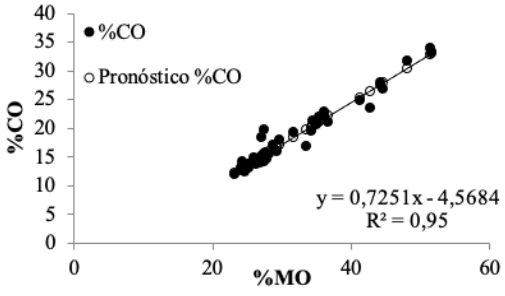


Fig. 8. Modelo C (ambos suelos), modelo de regresión lineal entre el método en húmedo y seco para la determinación del contenido de materia orgánica del suelo.

El modelo A (páramo) fue el único que cumplió todos los supuestos estadísticos con una P > 0,05 (Tabla III), y es válido con un R^2 por encima del 92%, valores similares a los obtenidos por [20] y [21], quienes obtuvieron R^2 mayores al 90 y 92%. Esto indica que el método de calcinación representa una buena metodología para la cuantificación de la materia orgánica de suelos de páramo o con características similares. El método en seco no requiere el uso de agentes oxidantes y ácidos fuertes para la cuantificación de la materia orgánica presente en el suelo, y es una alternativa más amigable con el ambiente [22], porque no genera residuos químicos que requieren un tratamiento especial.

Para el modelo B (agrícola), no se pudo decidir en la independencia de los errores y el modelo C (ambos suelos) contó con un error dependiente. Transformando la variable Y (%CO^2 o ln%CO) o la variable X (ln %MO) en el modelo B y C, el error no es independiente.

TABLA III
SUPUESTOS ESTADÍSTICOS DE LA REGRESIÓN LINEAL ENTRE LOS MÉTODOS EN HÚMEDO Y SECO PARA LA DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO.

Modelo	Correlación lineal (prueba de Fisher)	Distribución normal (prueba de Kolmogórov-Smirnov)	Independencia de los errores (prueba de Durbin Watson)	Homogeneidad de varianzas (prueba de Levene)
Modelo A Páramo	**F teórica = 4,4 y F experimental = 217** El modelo presenta una correlación lineal.	**P = 0,955** El modelo se ajusta a una distribución normal.	**D = 1,59 DL = 1,201 DU = 1,411** El modelo cuenta con un error independiente	**P > 0,05** El modelo cumple el requisito de homogeneidad.
Modelo B Agrícola	**F teórica = 4,4 y F experimental = 67** El modelo presenta una correlación lineal.	**P = 0,399** El modelo se ajusta a una distribución normal.	**D = 1,241 DL = 1,201 DU = 1,411** No se puede decidir entre H0 y H1.	**P > 0,05** El modelo cumple el requisito de homogeneidad.
Modelo C Ambos suelos	**F teórica = 4,08 y F experimental = 721** El modelo presenta una correlación lineal.	**P = 0,375** El modelo se ajusta a una distribución normal.	**D = 1,32 DL = 1,44 DU = 1,54** El modelo cuenta con un error dependiente	**P > 0,05** El modelo cumple el requisito de homogeneidad.

En varios estudios, los modelos matemáticos entre el método en húmedo y seco para la determinación de la MOS han variado, dado que influye las características del muestreo, métodos y tipo de suelo [19], [20], [21]. Las diferencias entre el %CO (método en húmedo) y %MO (método en seco) son debido a que el método de calcinación suele dar valores más altos, puesto que considera todo el contenido orgánico presente en el suelo [19].

Teniendo en cuenta que los modelos pueden o no ser validos estadísticamente, se debe seguir alimentando con otros tipos de suelos y a diferentes profundidades, con el fin de establecer modelos regionalizados o un modelo general.

IV. CONCLUSIONES

Todas las propiedades fisicoquímicas analizadas cuentan con diferencias significativas entre ambos tipos de suelo; esto se debe a que cuentan con órdenes diferentes y sus usos son distintos. El suelo de páramo es un ecosistema en estado de conservación y el suelo de uso agrícola ha estado expuesto a varias actividades antropogénicas, como la ganadería y cultivos, en los que se ha aplicado agroquímicos y se han utilizado técnicas no tan amigables con el recurso.

La mayor captura de carbono se presentó en el suelo de páramo, debido a las características del ecosistema no perturbado. Las propiedades fisicoquímicas del suelo agrícola han estado expuestas a diversos manejos que afectan su calidad. Sin embargo, el suelo agrícola tiene un porcentaje de captura de carbono no tan bajo, lo que indica que, si se le da un manejo sostenible, puede aumentar estos porcentajes y mejorar su calidad.

La variación espacial de la cantidad de carbono en ambos tipos de suelo permitió evidenciar las variaciones de este elemento por actividades a las que se encuentran expuestos o por las condiciones propias de los suelos en puntos específicos; sin embargo, ambos suelos representan un alto contenido de carbono orgánico, por lo que se debe promover su conservación. Además, la herramienta de interpolación utilizada permite realizar predicciones claras en áreas donde no se tenga información. Esta metodología puede utilizarse para el desarrollo de nuevas predicciones, investigaciones o proyectos que contribuyan con las medidas de mitigación del cambio climático.

El modelo matemático es solo una aproximación del valor de %CO sin tener que aplicar el método en húmedo. Dado que el modelo estadísticamente valido fue el modelo A (páramo), se recomienda utilizarlo con suelos de las mismas características. Sin embargo, se sugiere seguir alimentando este tipo de modelos con muestras de diferentes tipos de suelo y a distintas profundidades.

REFERENCIAS

[1] R. Lal, F. F. d. C. Mello, J. M. Damian, M. R. Cherubin y C. E. P. Cerri, *Soil Carbon Sequestration Through Adopting Sustainable Management Practices: Potential and Opportunity for the American Countries*. San José, Costa Rica: IICA, 2021.

[2] R. Lal, C. Monger, L. Nave y P. Smith, "The Role of Soil in Regulation of Climate," *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, *376*, p. 20210084, agosto 2021. HYPERLINK https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084

[3] J. E. Hernández, D. T. Torres y R. I. B. Hernández, "Captura de carbono en los suelos," *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *1*(2), julio-diciembre 2014. https://doi.org/10.29057/icbi.v1i2.506

[4] M. Panichini y C. Ovalle, "Secuestro de carbono en suelos, opción real para la mitigación," *Tierra Adentro*, *112*, pp. 16-20, enero 2020. https://hdl.handle.net/20.500.14001/5464.

[5] FAO, "La FAO presenta unas herramientas prácticas para alentar la captación del carbono orgánico del suelo," Organizaciones de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 8 septiembre 2021. https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/es/c/1438309/.

[6] B. Carvajal-Agudelo y H. Andrade, "Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia," *Orinoquia*, *24*(1), pp. 13-22, 2020. HYPERLINK "blank" https://doi.org/10.22579/20112629.587 .

[7] A. Díaz-Arango, "Captura de carbono en un sistema agroforestal con cacao (Theobroma cacao) en Victoria, Caldas," Trabajo de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia 2023. [En línea]. Disponible: https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/18746

[8] J. P. Manchabajoy-Cañar, D. Andrade-Díaz y Á. J. Castillo-Marín, "Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño," *Ciencia y Agricultura*, *19*(1), pp. 28-44, agosto 2022. "http://dx.doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358" 10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358 .

[9] M. . A. Hurtado-Naranjo , R. A. Alulema-Del Salto y T. A. Palacios-Cabrera, "Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, *16*(2), pp. 79-92, 2023. https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4323.

[10] J. A. Parra La Rotta y R. Ordoñez Noriega, "Estimación de la captura de CO_2 en los suelos del páramo la Cortadera, Boyacá Colombia," Trabajo de grado, Universidad de Lasalle, Bogotá, D.C., 2020.

[11] C. J. Fernández Pérez, G. E. Cely Reyes y P. A. Ramírez, "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), pp. 121-139, 2019. https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152

[12] A. Bolívar Gamboa, C. A. Bolívar Gamboa, N. Ordoñez Delgado, J. Gutiérrez Díaz, G. Alvarez Lucero, M. Guevara Santamaría, C. Olivera, G. Olmedo, S. Bunning y R. Vargas, "Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio," *Ecosistemas*, *30*(1), 2021. HYPERLINK https://doi.org/10.7818/ECOS.2019.

[13] J. S. Montero Bernal, "Modelamiento del almacenamiento y distribución del carbono orgánico del suelo a partir de las caractersticas físicas del paisaje y diferentes tipos de coberturas del páramo de Guancanas y las Delicias, en los municipios de Inzá, Silvia y Totoró, del departamento de Cauca," Trabajo de grado, Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, D. C., 2020. https://repository.javeriana.edu.co/items/9f7213b8-b851-4eae-b6cf-82384ff0e09c

[14] P. E. Santos, H. A. Roa, A. E. Darghan y J. C. Monroy, "Modelado espacial del carbono orgánico del suelo y su relación con otras propiedades químicas en el cultivo de arroz del distrito de riego del Norte de Santander Colombiano," *Gestión y Ambiente*, *21*(2), pp. 252-262, 2018. HYPERLINK "http://dx.doi.org/10.15446/ga.v21n2.73004" \t "_blank" 10.15446/ga.v21n2.73004 .

[15] W. R. Herrera Peña, "Distribución espacial del carbono orgánico y su relación con la fertilidad y calidad de los suelos en el valle de Sibundoy departamento del Putumayo," Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D. C., 2017. http://hdl.handle.net/10654/32013

[16] I. G. Valenzuela-Balcazar y E. Visconti, "Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *12*(1), pp. 233-243, enero-abril 2018. HYPERLINK https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349 .

[17] ESRI, "Comprender el análisis de interpolación," ArcGIS Desktop, 2021.https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/understanding-interpolation-analysis.htm.

[18] A. Walkley y I. A. Black, "An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method," *Soil Science*, *37*(1), pp. 29-38, 1934. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.

[19] G. E. Arévalo, J. . M. Sánchez-Amaya y I. Guillen-Marquina, "Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras," *Revista de Ciencias Ambientales*, *57*(1), pp. 1-13, noviembre 2022. http://dx.doi.org/10.15359/rca.57-1.11.

[20] J. . I. Bautista y J. J. Arévalo Hernandez, "Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación," *Ingeniería y Región*, *26*, pp. 20-28, agosto 2021. https://doi.org/10.25054/22161325.2527.

[21] M. Eyherabide, H. Sainz Rozas, P. Barbieri y H. E. Echeverría, "Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo," *Ciencia del Suelo*, *32*(1), pp. 13-19, marzo 2014. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100002&lng=es&tlng=es.

[22] S. Barrezueta-Unda, A. Cervantes-Alava, M. Ullauri-Espinoza, J. Barrera.León y A. Condoy-Gorotiza, "Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el oro-ecuador," Revista *FAVE-Ciencias Agrarias*, *19*(2), pp. 25-36, agosto 2020. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-77192020000200025&lng=es&tlng=es.

[23] L. La Manna, C. Bududa y V. Alonso, "Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la región Andino-Patagónica," *Ciencia del Suelo*, *25*(2), pp. 179-188, 2007.

[24] IGAC, *Datos abiertos Subdirección de Agrología*, Instituto geográfico Agustín Codazzi, 15 abril 2025. [En línea]. Disponible: https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia.

[25] FAO, *Standard Operating Procedure for Soil Bulk Density, Cylinder Method*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2023.

[26] FAO, *Standard Operating Procedure for Soil Moisture Content by Gravimetric Method*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2023.

[27] FAO, *Standard Operating Procedure for Soil pH Determination*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2021.

[28] FAO, *Standard Operating Procedure for Soil Organic Carbon. Walkley-Black Method: Titration and Colorimetric Method*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2020.

[29] J. B. Kauffman, D. C. Donato y M. F. Adame, *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares*, CIFOR, Indonesia, 2013.

[30] F. Núñez-Ravelo, M. Ugas-Pérez, R. Calderón-Castellanos y F. Rivas-Meriño, "Quantification of Organic Carbon and Organic Matter in Nonrhizospheric Soils and Covered by Avicennia germinans (L.) and Conocarpus erectus (L.) Located in Boca de Uchire, Unare Lagoon, State of Anzoátegui, Venezuela," *Revista Geográfica de América Central*, *66*(1), pp. 340-366, mayo 2021. http://dx.doi.org/10.15359/rgac.66-1.13.

[31] QGIS, "Análisis Espacial (Interpolación)," QGIS, 2002. [En línea]. Disponible: https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html.

[32] A. Porras Velázquez, "Diplomado en Análisis de Información Geoespacial: Tipos de muestreo," 2017. [En línea]. Disponible: https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/163.

[33] IGAC, *Manejo de suelos colombianos*, Bogotá, D. C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2014.

[34] J. L. Contreras-Santos, "Caracterización de sistemas ganaderos del Caribe seco para cuantificación de índices de calidad de suelo," *Agronomía Costarricense*, *45*(2), pp. 71-87, 2021. http://dx.doi.org/10.15517/rac.v45i2.47768.

[35] J. S. Gutiérrez Díaz, N. Ordoñez Delgado, A. B. Gamboa, S. Bunning, M. Guevara, E. Medina, C. Olivera, G. F. Olmedo, L. M. Rodríguez, V. Sevilla y R. Vargas, "Estimation of Organic Carbon in Paramo Ecosystem Soils in Colombia," Ecosistemas, 29(1), pp. 1855, abril 2020. HYPERLINK "https://doi.org/10.7818/ECOS.1855" https://doi.org/10.7818/ECOS.1855 .

[36] IGAC, *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá*, Bogotá, D. C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2005.

[37] M. C. Daza Torres, F. Hernández Florez y F. A. Triana, "Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico," *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, *67*(1), pp. 7189-7200, enero-junio 2014. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642

[38] M. A. Díaz-Granados Ortiz, J. D. Navarrete González y T. Suárez López, "Páramos: Hidrosistemas sensibles," *Revista de Ingeniería*, *1*(22), pp. 64-75, noviembre 2005. https://doi.org/10.16924/revinge.22.8

[39] IGAC, *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, D. C., 2014.

[40] A. d. J. Tamayo Vélez, "Nutrición y fertilización," en *Tecnología para el cultivo de la mora (Rubus glaucus Benth.)*, Bogotá, D. C., Agrosavia, 2020, pp. 147-166.

[41] S. D. García Guzmán, L. G. Bautista-Montealegre y M. . M. Bolaños-Benavides, "Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de cuatro municipios de Cundinamarca (Colombia) para la producción de plátano," *Revista U.D.C.A.: Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1), enero-junio 2019. HYPERLINK https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1192.

[42] E. Hoffland, T. W. Kuyper, R. N. Comans y R. E. Creamer, "Eco-Functionality of Organic Matter in Soils," *Plant and Soil*, *455*, pp. 1-22, agosto 2020. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9.

[43] D. S. Powlson, P. R. Hirsch y P. Brookes, "The Role of Soil Microorganisms in Soil Organic Matter Conservation in the Tropics," *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *61*(1), pp. 41-51, septiembre 2001. HYPERLINK "http://dx.doi.org/10.1023/A:1013338028454" \t "_blank" 10.1023/A:1013338028454 .



Carmen Stella Mosquera-Vivas. Química (2006) de la Universidad del Cauca con una Maestría en Ciencias-Química (2009) y Doctorado en Química (2014) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesora asistente del Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Bogotá, con experiencia en evaluación y desarrollo de métodos para determinar propiedades físicas y químicas del suelo, contaminación y uso de materiales de origen vegetal para la descontaminación y recuperación de suelos y aguas.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8411-9030.



Karol Dayanna García Rodríguez. Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad ECCI. Preferencia en temas de sostenibilidad, cambio climático y gestión ambiental.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1485-7035



Maria Jisset Calvo Saad. Ingeniera ambiental (2018) de la Universidad ECCI con una Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente (2023) de la Universidad de Manizales. Profesora asociada de la Dirección de Posgrados de la Universidad ECCI y consultora técnica. Experiencia en calidad y contaminación ambiental, gestión ambiental, química ambiental, energías renovables y negocios verdes.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6968-1145