



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental.

Autores:

Tanya Augusta Contreras Arévalo – CI: 0105680839

tanya.contreras95@gmail.com

René Fabricio Fernández Zhinín – CI: 0106080559

rffz@tuta.io

Director:

Ing. Marco Tulio Ramírez Matamoros, MSc – CI: 0702774936

Asesores:

Ing. Armando Molina Verdugo, Ph.D – CI: 0102347796

Prof. Veerle Vanacker, Ph.D – Pa: EN 065859

Ing. Óscar Patricio Morales Matute – CI: 0104728555

Cuenca – Ecuador

26 de febrero de 2021



RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo analizar la influencia de la vegetación y la topografía en el almacenamiento de carbono orgánico y el espesor del suelo en una microcuenca de páramo en el sur del Ecuador. Se seleccionaron 135 sitios de muestreo distribuidos dentro de la microcuenca de estudio. Los sitios seleccionados se clasificaron en función de la cobertura vegetal (pajonal, almohadilla y bosque) y la posición topográfica (cóncavo, convexo y recto). Se recolectaron muestras de suelo alteradas e inalteradas de los horizontes (O, A, AC y CA) en cada sitio. Se determinó la concentración de carbono orgánico (%C) y la densidad aparente (DA) para cada una de las muestras de suelo recolectadas con el objetivo de calcular el almacenamiento total de carbono (TCS). Los resultados mostraron valores medios de TCS de 27.43 kg/m², 34.27 kg/m², 41.05 kg/m², para las vegetaciones de pajonal, almohadilla y bosque, respectivamente; mientras que por la posición topográfica los valores medios variaron de 31.06 kg/m², 35.16 kg/m² y 36.53 kg/m², para cóncavo, convexo y recto, respectivamente. Los suelos con bosque son los que presentan mayor acumulación de carbono orgánico, seguidos por los suelos formados bajo las coberturas de almohadillas y pajonal; sin embargo, estas dos últimas representan a los suelos más importantes para las reservas de carbono debido a la extensión en el territorio. Asimismo, los resultados revelaron que la cobertura vegetal ejerce una mayor influencia sobre la profundidad del suelo (espesor del suelo) con respecto al efecto ejercido por la topografía, especialmente en el fondo de los valles y zonas planas cubiertos por la vegetación de almohadillas. Finalmente, este estudio resaltó la importancia del almacenamiento de carbono en el subsuelo como una fuente importante de carbono y que tendría que ser incorporado en investigaciones futuras con fines de modelización.

Palabras clave:

Almacenamiento total de carbono. Carbono orgánico. Vegetación. Topografía. Espesor del suelo.



ABSTRACT

The aim of this research was to analyze the influence of vegetation and topography on the storage of organic carbon and the thickness of the soil in a micro-basin of páramo in the south of Ecuador. A total of 135 sampling sites were selected, which were distributed within the study area. The sites were classified based on the vegetation cover (cushion plants, tussock grasses and native forest) and the topographic position (concave, convex and straight). Altered and unaltered soil samples were collected from the horizons (O, A, AC and AC) at each site. The organic carbon concentration (%C) and bulk density (DA) were determined for the collected soil samples in order to calculate the total carbon storage (TCS). Results showed average TCS values of 27.43 kg/m², 34.27 kg/m², 41.05 kg/m², for tussock grasses, cushion plants and forest vegetation respectively; while for the topographic position the average values varied from 31.06 kg/m², 35.16 kg/m² and 36.53 kg/m², for concave, convex and straight, respectively. Forest soils have the greatest accumulation of organic carbon, followed by soils formed under cushion plants and tussock grass covers; although the latter two represent the most important soils for carbon reserves due to their extension on the territory. Furthermore, results revealed that the vegetation cover exerts a greater influence on the soil depth (soil thickness) compared to the effect of topography, especially at the valley bottoms and plain areas covered by cushions plants. Finally, this study has highlighted the importance of carbon storage in the subsoil as an important carbon source and it should be integrated in future research for modelling purposes.

Keywords:

Total carbon storage. Organic carbon. Vegetation. Topography. Soil thickness.



ÍNDICE DE TRABAJO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
DEDICATORIA.....	11
AGRADECIMIENTOS.....	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Identificación del problema y justificación	16
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Conceptos Generales.....	19
2.1.1. Calentamiento global y efecto invernadero	19
2.1.2. Ciclo del carbono.....	19
2.2. Páramo	21
2.2.1. Características generales.....	21
2.2.2. Tipos de suelo de páramo	22
2.2.3. Cobertura vegetal.....	24
2.2.4. Topografía	26
2.3. Almacenamiento de carbono en el suelo	27
2.4. Importancia de almacenamiento de SOC.....	29
2.5. Relación Carbono/nitrógeno	30
2.6. Espesor del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono.....	30
3. METODOLOGÍA	32
3.1. Área de estudio	32
3.2. Determinación de los puntos de muestreo	34
3.3. Muestreo	38
3.3.1. Medición espacial de la profundidad del suelo	38
3.3.2. Toma de muestras alteradas e inalteradas.....	39
3.4. Preparación de muestras y ensayos de laboratorio	39
3.4.1. Secado y preparación de muestras de suelo.....	39
3.4.2. Determinación de la densidad aparente	40



3.5.	Análisis químico	41
3.6.	Almacenamiento de carbono en el suelo	41
3.7.	Análisis estadístico	42
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1.	Variación en el espesor del suelo y contenido de carbono orgánico con la topografía y vegetación.....	47
4.2.	Variación en la concentración del carbono orgánico.....	51
4.3.	Espesor del suelo a lo largo de una gradiente topográfica y de vegetación.....	56
4.4.	Almacenamiento del carbono como una función del espesor del suelo	58
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1.	Conclusiones.....	63
5.2.	Recomendaciones	64
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7.	ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Stock promedio en kg/m ² de carbono orgánico en varios espesores.....	24
Tabla 2:	Características físicas y químicas de sitios de muestreo	46
Tabla 3:	Resultados de prueba de Shapiro Wilk para determinar la tendencia en la distribución de datos TCS= Almacenamiento de carbono total (kg/m ²); Espesor_A= espesor del horizonte A (m); %C_A= porcentaje de carbono en el horizonte A (%)	49
Tabla 4:	Resultados de prueba no paramétrica Kruskal Wallis para tipo de vegetación y posición topográfica, comparación entre grupos a través de prueba post-hoc Dunn.	53
Tabla 5:	Correlación entre C/N y TCS para cada clase de vegetación.....	53
Tabla 6:	Resultados de la prueba paramétrica ANOVA de una vía para tipo de vegetación y posición topográfica, comparación entre grupos mediante prueba post-hoc Tukey HSD.....	62



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ciclo del Carbono.....	20
Ilustración 2: Toposecuencia a través de una ladera	27
Ilustración 3: Ubicación sitio de estudio. (a) Ecuador continental con ubicación del cantón Cuenca, (b) Mapa del cantón Cuenca y (c) Modelo de Elevación Digital (DEM) de la microcuenca Cuevas.	34
Ilustración 4: (a) Ortofotografía y (b) mapa de cobertura del suelo en la microcuenca Cuevas	35
Ilustración 5: (a) Modelo de elevación digital y (b) mapa de morfología del terreno de la microcuenca Cuevas	36
Ilustración 6: (a) Clases definidas en función de cobertura vegetal y topografía, y (b) sitios de muestreo en la microcuenca Cuevas	37
Ilustración 7: Medición del espesor de horizontes del suelo mediante barreno de media caña.....	38
Ilustración 8: Muestras inalteradas en anillos de Kopecky	39
Ilustración 9: Secado de las muestras alteradas.....	40
Ilustración 10: Diagramas de caja. (a) Topografía vs profundidad (b) vegetación vs profundidad (c) Topografía vs TCS y (d) vegetación vs TCS.....	47
Ilustración 11: Correlación de las variables, diagonal central indica histogramas de distribución de datos de cada variable, dispersión bi-variados (debajo de la diagonal) y valores de correlación de Pearson se localizan sobre diagonal central	50
Ilustración 12: Interpolación espacial de almacenamiento de carbono total (TCS) en kg/m^2	54
Ilustración 13: Diagramas de caja de (a) Topografía vs espesor del horizonte A (m); (b) Vegetación vs espesor del horizonte A (m); (c) Topografía vs carbono en el horizonte A (%); (d) Vegetación vs carbono en el horizonte A (%)	55
Ilustración 14: Diagrama de flujo para elaboración de mapa de cobertura vegetal y topografía.....	74
Ilustración 15: Procedimiento de medición espacial de la profundidad del suelo y muestreo (muestras alteradas e inalteradas)	75
Ilustración 16: Procedimiento en la preparación de muestras alteradas e inalteradas y elaboración de ensayos de laboratorio	76
Ilustración 17: Proceso de adecuación de información para cálculo de almacenamiento de carbono total (TCS)	77
Ilustración 18: Diagrama de flujo para análisis estadístico de resultados de TCS, contenido de carbono y profundidad del suelo	78



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Tanya Augusta Contreras Arévalo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía”, de conformidad con el Art.114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art.144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de febrero de 2021

Tanya Augusta Contreras Arévalo

C.I: 0105680839



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

René Fabricio Fernández Zhinín en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía”, de conformidad con el Art.114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art.144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de febrero de 2021

René Fabricio Fernández Zhinín

C.I: 0106080559



Cláusula de Propiedad Intelectual

Tanya Augusta Contreras Arévalo, autora del trabajo de titulación “Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 26 de febrero de 2021

Tanya Augusta Contreras Arévalo

C.I: 0105680839



Cláusula de Propiedad Intelectual

René Fabricio Fernández Zhinin, autor del trabajo de titulación “Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de febrero de 2021

René Fabricio Fernández Zhinin

C.I: 0106080559



DEDICATORIA

Al ángel que ahora me mira desde el cielo, con todo mi amor para Arturo Arévalo, gracias por tanto, me quedo con los recuerdos más bellos y con su sonrisa grabada en mi memoria.

En esta larga travesía tuve junto a mí a seres incondicionales, que jamás me dejaron caer y rendirme. A mis padres, Felipe y Judith que fueron mi motor e impulso, que me enseñaron lo importante que es luchar por lo que uno anhela. A mi abuelita Eudocia, que es y siempre será un ser de luz para mí, gracias por tanta bondad.

A mi hijo, Sebastián, y a mi compañero de vida, han sido mi inspiración para alcanzar esta meta y plantear nuevas en el camino. Juntos lograremos todo. Gracias por toda su paciencia, por los días malos y los buenos, la suma de todos esos momentos nos trae hasta aquí. Sus locuras han llenado de felicidad mi vida.

A mis hermanos Pablo, Diana y Andrea, por estar ahí incluso en los días más tormentosos y aguantar mi mal humor. Han sido los mejores compañeros de vida, los días han sido mejores con ustedes cerca.

Finalmente, pero no menos importante, a todos esos amigos que apoyaron cada uno de mis pasos. Aquellos que han estado incondicionalmente desde que empezó esta aventura universitaria. Los llevo siempre en mi corazón. Sé que les espera futuros brillantes, se lo merecen.

Tanya Contreras Arévalo



DEDICATORIA

A mis amigos, con quienes he compartido los momentos más memorables de mi vida. A Byron, una gran persona llena de talentos. A Cari, por mostrarme que siempre se puede seguir adelante sin importar qué pase. A Andrea, por tener la habilidad de contagiar de alegría a todos a su alrededor e impulsarme a hacer cosas que nunca pensé podría lograr.

A mis hermanos, De y Sebas, por cuidar de mí y darme los mejores consejos. A Gabicho, por preocuparse por nosotros a pesar de la distancia. Sé que siempre puedo contar con ustedes. A mi abuelita, con quien tuve la dicha de compartir sus últimas sonrisas.

A mi madre, María. Gracias por tener la fortaleza para luchar por nosotros día a día, por los valores que nos ha enseñado, por darnos un lugar donde sentirnos protegidos. Gracias por ser esa persona que incesantemente vela por nuestro bienestar. Su deseo de vernos triunfar se ha ido cumpliendo poco a poco y es solo el comienzo.

René Fernández



AGRADECIMIENTOS

En este largo camino para alcanzar esta meta tan anhelada, existieron personas que con su ayuda hicieron esto una realidad. Nuestros sinceros agradecimientos al Ing. Marco Ramírez, Ing. Óscar Morales y Prof. Veerle Vanacker. Particular agradecimiento al Dr. Armando Molina por la contribución científica en la escritura de la tesis y la co-supervisión del trabajo durante la ejecución del mismo. Ustedes hicieron que todo esto sea posible, muchas gracias por la paciencia, el tiempo y la dedicación a este proyecto. Son gratos los recuerdos que nos llevamos. No nos queda más que decirles ¡Gracias!

Agradecemos a las instituciones que apoyaron este proyecto de pregrado como son la Universidad de Cuenca (PROMAS) y la Universidad de Lovaina –la-Nueva (Bélgica) a través del Proyecto inter-universitario “Linking global change with soil and water conservation in the High Andes” (ParamoSus), el cual está financiado por ARES (Académie de Recherche et D’Enseignement Supérieur) de Bélgica. El proyecto brindó el apoyo logístico y económico para la ejecución de esta investigación, que pretende dar a conocer el valor intrínseco de los ecosistemas de páramo, más allá de los beneficios que este pueda brindar. De esta forma expresamos nuestra enorme gratitud a quienes hacen parte del Programa para el Manejo del Agua y Suelo (PROMAS) y al Departamento de Tierra y Ciencias Ambientales de la Universidad Católica de Lovaina por abrirnos sus puertas.

Agradecemos también a nuestro compañero de largos viajes y extenuantes caminatas, Diego Zúñiga. Además, extendemos este agradecimiento a quienes en diversas etapas del proyecto nos ayudaron y acompañaron en el levantamiento de información.

Finalmente, muchas gracias a todos aquellos que con su conocimiento nos orientaron a lo largo de este camino. Gracias por sus consejos, por esas ganas de apoyar y ayudar. Gracias por contribuir con tanto.

Tanya Contreras y René Fernández



1. INTRODUCCIÓN

Los suelos contienen grandes reservas de carbono orgánico y su almacenamiento excede a lo que está presente en la atmósfera (Davidson & Janssens, 2006). Por eso los suelos desempeñan un rol primordial en la mitigación del cambio climático a través del almacenamiento de carbono y la reducción de las emisiones de gases en la atmósfera. En este sentido, los suelos volcánicos retienen las mayores y más persistentes reservas de carbono del suelo (Kramer & Chadwick, 2016) contribuyendo de manera significativa a las reservas globales del carbono en el suelo.

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático en su tercer informe sentenció que las nuevas evidencias señalan que la mayoría del calentamiento del planeta en los últimos 50 años han sido producto del incremento de gases de efecto invernadero (por ejemplo CO_2 , CH_4 , NO_x) (Ballester et al., 2006); por lo que, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) han encaminado varias acciones a reducir las emisiones atmosféricas a través de acuerdos intergubernamentales, tal es el caso del Acuerdo de París en el año 2015, siendo el primer acuerdo universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático, que pretende evitar el calentamiento global a niveles peligroso (por debajo de un incremento de 2 °C) y persistiendo en los esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C. Sin embargo, en la décima edición del Informe sobre Disparidad en las emisiones de la ONU-Medio Ambiente el resumen fue desalentador, pues los países no lograron poner freno al aumento de emisiones mundiales de GEI, indicando que no bastará con cambios progresivos para desacelerar el calentamiento global, sino el empleo de medidas rápidas y transformadoras para cumplir con los objetivos planteados (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2019)

La mayoría del dióxido de carbono (CO_2) que existe en la atmósfera se produce por las reacciones biológicas que ocurren en el suelo. El almacenamiento de carbono, se fundamenta en la remoción del dióxido de carbono atmosférico, para ser almacenado en los diferentes componentes del ecosistema, principalmente en el suelo. De esta forma, el buen manejo y conservación de los ecosistemas aseguraría su almacenamiento, pues menos dióxido de carbono existirá en la atmósfera que contribuirá al cambio climático.



Mientras que cualquier alteración que se dé en el mismo provocaría la volatilización de éste (Llanos & Escandón, 2016).

La importancia ambiental y económica de los páramos andinos, en especial sus suelos, es innegable; pues desempeñan funciones primordiales en la regulación hídrica, en el almacenamiento de carbono y en el ciclo biogeoquímico de los nutrientes en el suelo. Por lo tanto, se considera que alrededor de 10 millones de personas dependen de la provisión de agua de los ecosistemas de páramo en el norte de los Andes (Buytaert et al., 2006). Según la FAO, en el año 2000, el 98% del agua empleada para el riego en Ecuador correspondía a recursos hídricos superficiales; en las zonas altas las principales fuentes de este recurso son los páramos (Buytaert et al., 2007).

Los suelos en los ecosistemas de páramo son considerados como grandes reservorios de carbono (Ramírez & Cisneros, 2015; Tonneijck et al., 2010), debido a su elevada capacidad de almacenamiento ya sea en forma orgánica e inorgánica. Sin embargo, actividades antrópicas, como agricultura, deforestación y ganadería, conducen a un incremento en la liberación del carbono hacia la atmósfera (los suelos se convierten en fuentes de CO₂) y a una reducción del contenido de carbono del suelo (Hernández et al., 2014).

En general, los suelos de páramo son suelos negros y húmedos. Debido a la alta humedad y el clima frío característico de la zona, la descomposición de la materia orgánica es lenta, provocando la acumulación de una gruesa capa de suelo orgánico (Mena et al., 2000). Entre las características más importantes de estos suelos son: densidad aparente baja, elevado contenido de carbono, alta retención de humedad, susceptibilidad al secamiento irreversible, bajo pH y alta capacidad de regulación hídrica (Podwojewski & Poulénard, 2000; Ramírez & Cisneros, 2015).

Los principales tipos de suelo de páramo son los Andosoles e Histosoles. Estos suelos se forman como resultado de la meteorización rápida del material volcánico, alta precipitación, buen drenaje, y la producción y almacenamiento de materia orgánica (Mizota & Reeuwijk, 1989). Los Andosoles se caracterizan por la formación de complejos de aluminio con la materia orgánica, por lo tanto, estos acumulan grandes cantidades de carbono orgánico (Molina et al., 2019). Los Histosoles, al igual que los Andosoles, presentan una gran capacidad de retención hídrica y densidad aparente baja;

son característicos de zonas en las que el suelo se encuentra saturado en gran parte del año y la temperatura es baja, la escasa aireación y su fuerte acidez permiten la acumulación de la materia orgánica (Cisneros et al., 2010; Poulenard et al., 2003).

1.1. Identificación del problema y justificación

Grandes cantidades de carbono se intercambian continuamente entre la atmósfera y otros reservorios de almacenamiento que incluyen los océanos, vegetación, y los suelos en la superficie terrestre; se ha demostrado que las actividades antropogénicas que se han ejecutado en los últimos años han incidido en este comportamiento (Iversen et al., 2014).

El aumento de la concentración de CO₂ atmosférico evidencia la tendencia creciente de este gas a nivel mundial, pues ha pasado de 280 partes por millón (ppm), en la época pre industrial, a cifras nunca antes registradas, pues se ha reportado niveles de CO₂ cercanos a 415 ppm en 2019 (Monroe, 2019). Una de las principales causas de este progresivo crecimiento ha sido la degradación, transformación y eliminación de ecosistemas forestales, los cuales son grandes reservorios de carbono (Alfaro et al., 2014).

En las últimas décadas, la conversión de pajonal a tierras agrícolas y la deforestación de los bosques naturales ha llevado a la degradación de los suelos en los ecosistemas de páramo (Molina et al., 2015). El crecimiento poblacional, urbanización y degradación del suelo en los valles inter-andinos, ha llevado a que la frontera agrícola se extienda hacia las zonas altas en los páramos (Vanacker et al., 2003), a pesar de la dificultad técnica que esto implica, pues los suelos deben ser drenados intensamente al tratarse de zonas anegadas (Buytaert et al., 2006). En este contexto, la creciente presión humana sobre los recursos naturales en los páramos, ha provocado el aumento del estrés en el ecosistema, principalmente del recurso suelo.

El suelo actúa como un componente central en el ciclo hidrológico y alimenta los ciclos biogeoquímicos terrestres (Chadwick et al., 2003). Por eso, es importante mantener la capacidad reguladora del suelo, ya que cualquier alteración del mismo puede afectar las propiedades físicas-químicas con consecuencias adversas para la formación y desarrollo del suelo. El suelo desempeña un papel fundamental en el ciclo del carbono, almacenando grandes cantidades de este elemento tanto en forma orgánica como inorgánica. El suelo constituye la mayor reserva de carbono terrestre: se estima un total de 2344 Gt C, 2 veces



más que la suma de carbono contenido en la atmósfera y la vegetación (Ciais et al., 2013). Se estima que la cantidad de carbono en el primer metro de superficie de suelo es de 2500 Gt (Lok et al., 2013).

Desde la revolución industrial, la transformación de ecosistemas naturales en zonas agrícolas y ganaderas ha provocado la liberación de entre 50 a 100 Gt de carbono del suelo a la atmósfera (Dávalos et al., 2008); agravando los problemas tales como el cambio climático y el calentamiento global. Este proceso de liberación conduce a una alteración del equilibrio entre las entradas y salidas de carbono dentro del sistema subterráneo afectando las reservas de carbono del suelo. Las entradas provienen principalmente de las hojarascas y raíces, mientras que las salidas están dominadas por los flujos de dióxido de carbono desde el suelo (Davidson & Janssens, 2006). Adicionalmente, el manejo inapropiado de la tierra lleva a una mayor descomposición del suelo por la labranza aumentando las pérdidas de suelo por erosión (Lemus & Lal, 2005).

En este sentido, la microcuenca Cuevas localizada en un ecosistema de páramo al sur del Ecuador presenta características ideales para estudiar el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono. Los suelos están formados sobre material volcánico fuertemente meteorizado de origen post-glacial (Molina et al., 2019) y bajo condiciones climáticas húmedas y frías (Podwojewski & Poulencard, 2000). Estas características co-evolucionan con la topografía e hidrología para dar lugar a la formación de pajonales y humedales (*wetlands*), los cuales contienen grandes cantidades de carbono en sus suelos (Asanza & Barahona, 2015; Molina et al., 2019).

Además, esta región es fuertemente impactada por las actividades antrópicas, tales como el sobrepastoreo, agricultura y quemadas (Asanza & Barahona, 2015); que ponen en riesgo la funcionalidad de este ecosistema y los servicios ambientales que brinda. Debido a esto la Empresa Pública Municipal de Telefonía, Agua Potable y Alcantarillado – ETAPA EP – ha realizado la adquisición de una extensa área (Cuevas) con la finalidad de preservar y recuperar las fuentes de agua para lo cual el carbono orgánico del suelo es primordial (Asanza & Barahona, 2015).

Las prácticas inapropiadas de manejo del suelo podría inducir a la liberación del carbono almacenado, como el caso del sobrepastoreo que conllevaría a una alteración de la



vegetación de la zona, desencadenando una alteración de la materia orgánica en descomposición y en la estructura del suelo (Van Ypersele de Strihou, 2019).

Esta investigación permite explorar como el espesor del suelo (aquí como sustituto de desarrollo del suelo), la topografía y el tipo de vegetación afectan los procesos de almacenamiento de carbono orgánico en los suelos de páramo. Este tema es de interés debido a que los suelos volcánicos cumplen funciones cruciales en el balance global de carbono y desempeñan un rol primordial para la mitigación y adaptación al cambio climático (Kramer & Chadwick, 2016). De esta forma se busca establecer una base científica que sirva de apoyo en la toma de decisiones con respecto al manejo sostenible de ecosistemas altamente frágiles como los páramos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en función de la cobertura vegetal y la topografía en la microcuenca Cuevas del cantón Cuenca.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Analizar la variabilidad espacial en el espesor del suelo en diferentes tipos de cobertura vegetal (almohadilla, bosque nativo y pajonal) y configuraciones topográficas.
- ii. Determinar valores de almacenamiento de carbono en el suelo y analizar la distribución espacial en el paisaje.
- iii. Evaluar la influencia del desarrollo del suelo en la acumulación del carbono orgánico.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos Generales

2.1.1. Calentamiento global y efecto invernadero

El Calentamiento Global se define como un incremento de la temperatura media del planeta basado en análisis de datos históricos; los cuales indican un incremento de casi 1 °C con respecto a los niveles preindustriales, proyectándose que entre el año 2030 y 2052 la temperatura del planeta se incrementará en 1.5 °C en relación a ese periodo. Además, se estima que el calentamiento global producto de las emisiones antropogénicas aumenta actualmente 0.2 °C por decenio (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2019).

El Calentamiento Global ha mostrado un continuo patrón de incremento del CO₂ atmosférico, por lo que sugiere que esta tendencia de calentamiento es consecuencia de una intensificación del efecto invernadero (Caballero et al., 2007).

El efecto invernadero, es un mecanismo natural que ha existido desde que la Tierra tiene atmósfera; mediante el cual, determinados gases que constituyen la atmósfera planetaria, retienen parte de la energía emitida por el suelo por haber sido calentado por la radiación solar (CIIFEN, 2019).

Estos compuestos se denominan gases de efecto invernadero (GEI) siendo los siguientes: Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ozono (O₃), óxido nitroso (N₂O), hexafluoruro de azufre (SF₆), perfluorocarbonos (PFC), hidrofluorocarbonos (HFC) (Llanos & Escandón, 2016).

2.1.2. Ciclo del carbono

El carbono es el cuarto elemento más abundante en el universo, y es absolutamente esencial para la vida en la Tierra. Cada organismo necesita carbono ya sea para su estructura, energía, o como los seres humanos para ambos. El ciclo del carbono se define como el movimiento del carbono, en sus diversas formas, entre la atmósfera, océanos, biósfera, y litósfera. El ciclo consiste de varios reservorios de almacenamiento de carbono y los procesos mediante los cuales los diversos reservorios intercambian carbono (Harrison et al., 2003) (Ilustración 1). La diferencia entre reservas de carbono y un flujo

es notoria, pues al hablar del primer término este refiere a todo aquello que se encuentra almacenado en los diferentes componentes de los ecosistemas, mientras que el segundo, a todos los procesos que pueden afectar las reservas. Las reservas de carbono se expresan en términos de peso por unidad de área, mientras que los flujos siempre incorporan la variable tiempo cuantificando la entrada y salidas de carbono (Honorio & Baker, 2010).

Se denomina sumidero de carbono a aquellas zonas en las que la cantidad almacenada de carbono aumenta con el tiempo, es decir, si más carbono entra en un reservorio de lo que sale, así el cambio en las reservas de carbono es positivo (Honorio & Baker, 2010). Por otro lado, si más carbono sale de un reservorio de lo que entra, ese reservorio se considera una fuente neta de carbono, por lo tanto el cambio en las reservas de carbono es negativo (Harrison et al., 2003).

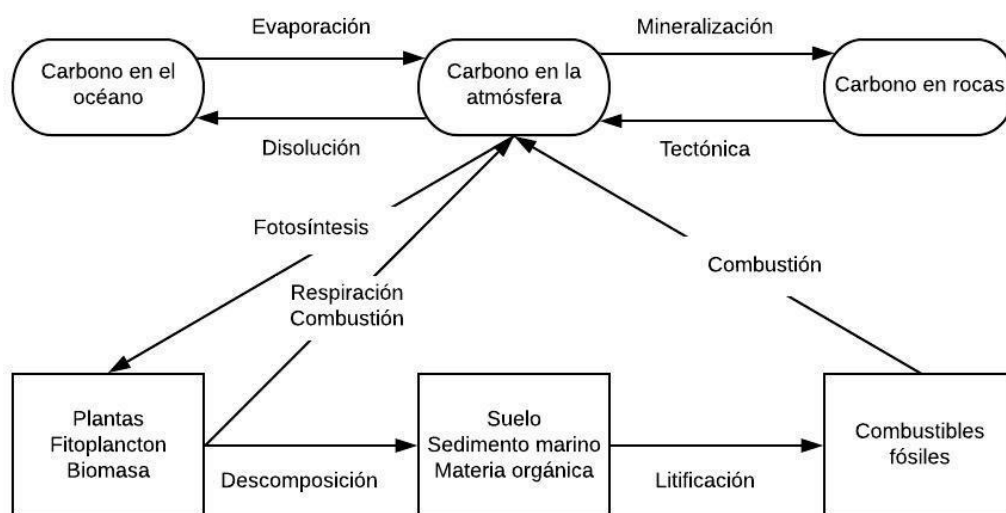


Ilustración 1: Ciclo del Carbono

Nota. Flechas indican flujos de carbono, los recuadros sumideros de carbono y los óvalos indican productos del ciclo de carbono

El carbono circula entre la materia orgánica y el ambiente físico - químico constantemente. Este movimiento ocurre en diferentes escalas espacio-temporales. La presencia de CO_2 y otros gases en la atmósfera permite la absorción de radiación infrarroja proveniente del sol y de la superficie de la tierra posibilitando el desarrollo de la vida. El ciclo del carbono inicia con la captura de CO_2 atmosférico por las plantas superiores a través de pequeños poros en sus hojas denominados estomas para ser



empleado en la fotosíntesis (Van Ypersele de Strihou, 2019). Una parte de este CO₂ regresa a la atmósfera mediante la respiración autotrófica, mientras que la otra cantidad de éste se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis denominándose producción primaria bruta (PPB) (Osnaya et al., 2004). Eventualmente, el carbono que ha sido fijado por las plantas regresa a la atmósfera mediante dos procesos: respiración heterótrofa y por la combustión de fuegos naturales y antropogénicos (Ilustración 1). Gran parte de este carbono se incorpora al suelo mediante biomasa muerta donde regresa a la atmósfera en diferentes periodos según sus características químicas (Osnaya et al., 2004).

El ciclo de Carbono, uno de los principales ciclos biogeoquímicos, puede ser separado en dos componentes: geológicos y biológicos. El ciclo geológico del carbono considera tanques menos activos como océanos profundos y reservorios geológicos, en estos el tiempo de residencia varía de cien mil a un millón de años. Mientras que el ciclo biológico del carbono corresponde a depósitos más activos como: atmósfera, biosfera, pedosfera o aguas superficiales en los que el tiempo de residencia es de año a milenio (Van Ypersele de Strihou, 2019).

2.2. Páramo

2.2.1. Características generales

Los páramos, son ecosistemas que cubren las partes más elevadas de la cordillera de Los Andes (>3200 m.s.n.m) (Podwojewski & Poulenard, 2000); el clima en estas zonas es generalmente frío y húmedo; la alta humedad se debe principalmente a las bajas temperaturas y elevadas altitudes a la que se localizan estos ecosistemas; por eso la evaporación es muy baja, produciendo un alto rendimiento de agua (precipitación - evaporación). Además del aporte de la precipitación vertical (lluvia), existe una gran contribución hídrica a través de la precipitación horizontal (intercepción de niebla) (Hofstede, 1997).

Los páramos constituyen una riqueza ecológica y es un sustento económico para la sociedad, el cual se ve reflejado en tres aspectos importantes tales como: i) el ecosistema de páramo tiene un alto valor científico y ecológico por su flora endémica y su paisaje único (función ecológica); ii) los páramos son fuentes para la producción de alimentos (función agrícola); y iii) estos ecosistemas son fundamentales para la regulación



hidrológica y son la principal fuente de agua potable para la población asentada en la parte norte de los Andes tropicales (Buytaert et al., 2006; Hofstede, 1997). Por otro lado, a más de la importancia económica que presenta, estos ecosistemas brindan varios servicios ecosistémicos, entre los principales podemos mencionar: son grandes suministros de agua, almacenan grandes cantidades de carbono en el suelo, y albergan dando protección a la biodiversidad de la zona (Van Ypersele de Strihou, 2019).

A nivel nacional, los ecosistemas de páramo constituyen el 5% del territorio y se distribuyen en 18 de sus 24 provincias, concentrándose aproximadamente 68% de este ecosistema en Napo, Morona Santiago y Azuay (Amay, 2018).

Los suelos de páramo son bastante homogéneos en cuanto a su composición química y propiedades físicas, a pesar de su accidentada topografía; sin embargo, los suelos que cubren las pendientes más fuertes se encuentran poco desarrollados y sus horizontes están ligeramente diferenciados (Van Ypersele de Strihou, 2019).

Una de las principales características de los suelos de páramo, es su alta capacidad de almacenamiento de carbono, debido a la lenta descomposición de la materia orgánica a causa de las bajas temperaturas y alta humedad, y un alto grado de meteorización química el cual crea porosidad en el material parental (Molina et al., 2018) Por este motivo, en zonas de baja intervención humana siempre se encuentran suelos humíferos, los cuales tienen una gran retención de agua debido a que la materia orgánica tiene la capacidad de absorber agua por una suave carga eléctrica; es decir, existe una relación directamente proporcional entre el agua y la materia orgánica: a mayor cantidad de agua existe mayor cantidad de materia orgánica (poca descomposición y alta absorción) (Amay, 2018).

2.2.2. Tipos de suelo de páramo

Los suelos de mayor predominio en los páramos son los Andosoles e Histosoles, pero en zonas de gran pendiente se puede identificar Leptosoles y Regosoles, que son poco profundos (Amay, 2018).

Estos suelos se caracterizan por presentar en sus primeros centímetros de profundidad suelos negros con un alto contenido de materia orgánica (Spaargaren, 1999), sin embargo, debido a la tasa de descomposición, es posible identificar en las capas superficiales de la matriz del suelo restos orgánicos (horizonte O), los cuales se van incorporando según su



desarrollo (horizonte A). Mientras que aquellos que presentan en su matriz fragmentos de material menos consolidado, con fragmentos rocosos, y poco alterados corresponden a suelos menos desarrollados (horizonte AC y CA).

2.2.2.1. Andosoles

Los Andosoles, en función a la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés), también llamados Andisoles (clasificación de la Soil Taxonomy), son suelos de color oscuro, característicos de zonas de páramo. Estos tienen una capacidad extraordinaria de retener agua y poseen una baja densidad aparente (Borja et al., 2008). Se forman sobre material volcánico, principalmente depósitos de cenizas y vidrios volcánicos. Estos son ricos en aluminio y hierro, formando complejos organometálicos con el carbono orgánico del suelo (Van Ypersele de Strihou, 2019); estos complejos son particularmente importantes ya que la materia orgánica atada a minerales reactivos del suelo (contienen hierro y aluminio) es un importante mecanismo para el almacenamiento de carbono a largo plazo (Chadwick et al., 2003; Kramer & Chadwick, 2016).

Estos suelos, cuando son jóvenes, son altamente porosos, ligeros, de colores oscuros y permeables; su mayor limitante es su gran capacidad de retener fósforo de forma no biodisponible para su asimilación por las raíces de las plantas (Ibáñez & Manríquez, 2011). La retención o fijación del fósforo ocurre a la par con la disponibilidad del aluminio, por lo tanto, los suelos son tóxicos en este elemento limitando la producción de plantas.

Estudios previos en el área demuestran que existe un alto contenido de carbono en el horizonte A, siendo su valor promedio de 9.4%, el cual es significativamente mayor al presentando en los horizontes AC, CA y C (Molina et al., 2019). Mientras que estudios realizados en el páramo de Quimsacocha (ubicado al suroeste de la ciudad de Cuenca) revelan que en horizontes superficiales de Andosoles la materia orgánica se encuentra presente en un 26,50% (Borja et al., 2008).

2.2.2.2. Histosoles

Estos suelos son característicos de zonas que se encuentran constantemente saturadas (exceso de agua en el perfil durante gran parte del año), en las que las condiciones

climáticas permiten la acumulación de materia orgánica. Estos suelos presentan materia orgánica incluso a profundidades mayores a 40 cm (Borja et al., 2008). Estos están constituidos principalmente por restos de vegetación (plantas de bosque o musgos) que se encuentra más o menos descompuesta.

En estos suelos, a diferencia de otros, el material parental es material orgánico fresco. Para esto se requiere de factores formadores tales como: clima frío y húmedo (retrasa la descomposición de la materia orgánica) y relieve plano o zonas de depresión (acumulación de agua). Cabe señalar que el tiempo de formación de los Histosoles es prolongado, marcado por el ritmo de descomposición de la materia orgánica (Ibáñez et al., 2011).

Según (Borja et al., 2008) en un estudio realizado al sur del país en un ecosistema de páramo, en los primeros centímetros de Histosoles se determinó que existe un 33.11% de materia orgánica, de esta forma evidenciando el alto contenido de materia orgánica que presentan estos ecosistemas.

Según la taxonomía, el tipo de suelo que presenta una mayor fijación de carbono a nivel mundial son los Histosoles, seguidos por los Andosoles (Galicia et al., 2016). Véase Tabla 1.

Tabla 1: Stock promedio en kg/m² de carbono orgánico en varios espesores

Tipo de suelo	0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm
Andosol	11.4	16.5	25.4
Histosol	28.3	46.4	77.6

Fuente: van Ypersele de Strihou, 2019

2.2.3. Cobertura vegetal

El rol que desempeña la cobertura vegetal en el ciclo de carbono es fundamental, consecuentemente, en el almacenamiento de carbono en el suelo. De esta forma se conoce que el CO₂ de la atmósfera es absorbido por las plantas constituyendo así la materia orgánica. Cuando la planta muere y cae al suelo los organismos vivos se encargan de descomponerla provocando la liberación de una parte de CO₂ a la atmósfera y de elementos químicos para el suelo. La materia orgánica remanente constituye el humus del

suelo. Además, la cobertura vegetal permite el desarrollo de un suelo más grueso que previene la erosión y pérdida de nutrientes (Vandecasteele, 2017).

2.2.3.1. Pajonal

El pajonal se caracteriza por presentar hojas largas y delgadas formando penachos que dan protección a las hojas jóvenes que crecen en su interior (la temperatura no desciende a menos de cero grados en el interior del penacho) (Hofstede, 1995) . Las principales especies que constituyen estas estructuras corresponden a los géneros: *Stipa*, *Calamagrostis*, *Festuca*, y *Ciperáceas* (Asanza & Barahona, 2015). Las hojas muertas permiten la conservación de nutrientes dentro de la estructura y crean un tipo “suelo colgante” ya que se descomponen permitiendo el crecimiento de nuevas raíces en el interior (Hofstede, 1995).

Los pajonales se encuentran constantemente sujetos a incendios provocados por agricultores para apoyar el sistema tradicional de cría de ganado (Suárez & Medina, 2001).

2.2.3.2. Almohadilla

Este tipo de vegetación se encuentra especialmente en zonas poco drenadas (Asanza & Barahona, 2015). Las plantas de almohadilla se han adaptado de manera óptima en este ambiente, debido a su baja estatura y forma compacta. Las mismas se caracterizan por favorecer el desarrollo de microclimas menos fríos dentro de su dosel. Este tipo de vegetación presenta alta eficiencia en la producción y retención de materia orgánica, así como la conservación de nutrientes y humedad (Cavieres et al., 2002).

Algunas de las especies características de las almohadillas son: *Azorella pendunculata*, *Plantago rigida*, y *Distichia muscoides* (Asanza & Barahona, 2015).

2.2.3.3. Bosque de *polylepis*

En el paisaje de páramo se puede observar una gran predominancia de pajonales, a pesar de esto, existen parches de especies arbóreas bien adaptadas a estas grandes altitudes y se encuentran de forma aislada o como remanentes de bosques preexistentes, principalmente de bosques monotípicos de *Polylepis*, *Gynoxys* y *Buddleja* (Beltrán et al., 2009).

Los bosques nativos se caracterizan principalmente por presentar árboles del género *Polylepis*, los cuales se caracterizan por presentar corteza “escamosa” de color rojizo semejante a papel, por esta razón se lo conoce también como “árbol de papel” (Asanza & Barahona, 2015).

2.2.4. Topografía

El suelo presenta ciertas particularidades al analizar los transectos topográficos desde la parte superior de la ladera hasta la inferior y la secuencia se denomina catena. La cumbre es una superficie plana y estable que presenta flujos de agua y sedimentos más débiles y uniformes con respecto a los siguientes segmentos de pendiente; en la cual la mayor parte del agua que cae se infiltra provocando mayor lixiviación y suelos bien desarrollados (Vandecasteele, 2017).

Se denomina escarpe a la zona que presenta la convexidad máxima (Ilustración 2), por lo que existe dominio de escorrentía y erosión provocando un menor tiempo de residencia del suelo presentándose suelos jóvenes, secos y delgados con una textura más gruesa y con menos contenido orgánico. La zona de pendiente predominante, es una zona de transición entre la erosión y acumulación, el gradiente de pendiente es a menudo constante en esta zona.

La zona de estribación presenta acumulación de agua y sedimento pues se caracteriza por su curvatura cóncava, lo que provoca horizontes A gruesos. Las condiciones más húmedas favorecen el desarrollo de la vegetación con mayor contenido orgánico (Vandecasteele, 2017).

El pie de ladera es la parte más baja, donde la convergencia del agua y sedimentos de la parte superior es común, ocasionando el estancamiento de agua, alterando la lixiviación de los elementos. Generalmente presenta suelos gruesos y bien desarrollados (Drever, 2005).

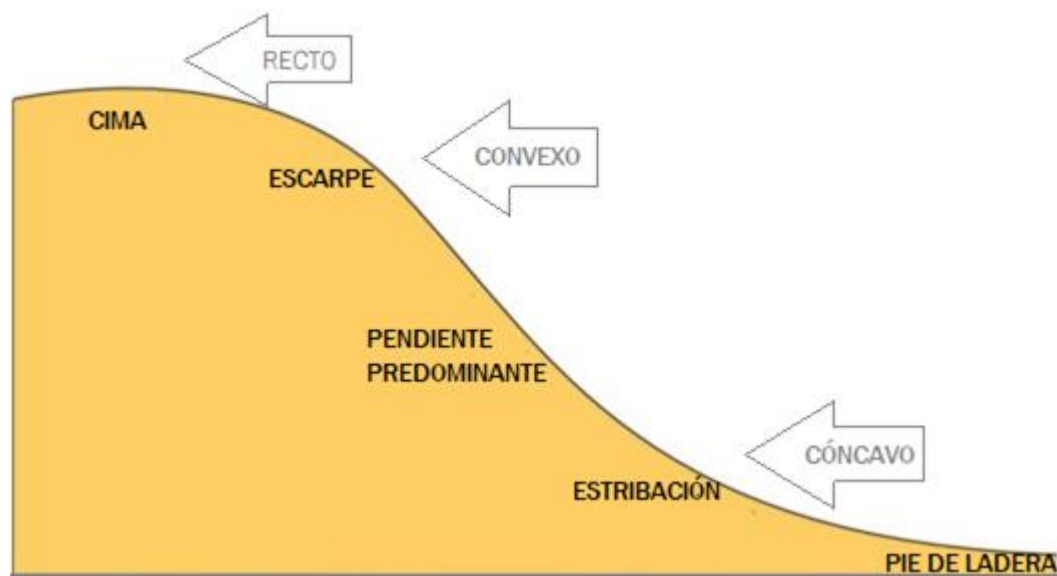


Ilustración 2: Toposecuencia a través de una ladera

Fuente: Vandecasteele, 2017

2.3. Almacenamiento de carbono en el suelo

Los suelos han sido considerados como sumideros de carbono, debido a su capacidad de almacenar este elemento en forma orgánica e inorgánica, el cual sobrepasa los niveles de almacenamiento que presentan la vegetación y la atmósfera. Actividades antrópicas como la deforestación, pastoreo y agricultura han provocado un incremento en la tasa de liberación de carbono hacia la atmósfera, lo que ha significado un aceleramiento del calentamiento global (Hernández et al., 2014).

La materia orgánica es un componente clave en el suelo, pues su presencia influye en la mejora de la calidad del mismo a través de una mayor retención de agua y nutrientes; lo que resulta en una mayor productividad del suelo, tanto en entornos naturales como agrícolas. El suelo está constituido por compuestos orgánicos que le proporcionan un alto enriquecimiento en carbono, por lo tanto, los niveles de carbono orgánico en el suelo (SOC) están directamente relacionados con la cantidad de materia orgánica presente (Ontl & Schulte, 2012).

El carbono orgánico en el suelo se presenta en forma de aminoácidos y azúcares (moléculas simples), mientras que, en moléculas compuestas en forma de celulosa,



lignina, proteínas o como residuos de vegetación y microbios (Van Ypersele de Strihou, 2019).

Los niveles de carbono orgánico del suelo (SOC) dependen de procesos del ecosistema tales como: fotosíntesis, respiración y descomposición. Pues mediante la fotosíntesis se realiza la entrada de carbono al suelo. La cantidad de carbono en el suelo es resultado de forma directa del crecimiento y muerte de las plantas, e indirectamente de la transferencia de compuestos enriquecidos con carbono de las raíces a los microbios del suelo (Ontl & Schulte, 2012). La pérdida de carbono se debe a procesos de erosión del suelo y lixiviación de carbono disuelto en aguas subterráneas. Un papel igual de importante es desempeñado por los procesos tales como: la respiración, descomposición y combustión (Dávalos et al., 2008).

Cuando las entradas y salidas de carbono están en equilibrio no se dan cambios en los niveles de SOC, mientras que, si existe un mayor aporte producto de la fotosíntesis vs la pérdida de C, los niveles de SOC aumentan con el tiempo.

A escala de una cuenca, la capacidad de almacenamiento de carbono está influenciada por las acciones de control ejecutadas sobre los procesos del ecosistema. Los cambios en los insumos de carbono, en las pérdidas producto del uso y gestión del suelo, resultan en cambios en la entrada y tasas de pérdida de carbono, por lo tanto, en variaciones en la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo (Thompson & Kolka, 2005). Se estima que en los primeros 30 cm de profundidad del suelo se encuentra entre 39 y 70% de las reservas de carbono orgánico, mientras que para los 50 cm de profundidad se contempla entre 58 a 81% de este. Por lo tanto, un manejo inadecuado del suelo provocaría la liberación de éste a la atmósfera (Van Ypersele de Strihou, 2019).

Otro factor a tomar en cuenta es la biomasa de la vegetación leñosa, que es la cantidad total de materia orgánica viva que se encuentra arriba del suelo (incluyendo hojas, ramas, corteza y varas) la cual, a través de su acumulación aporta al almacenamiento de carbono en el suelo (Dávalos et al., 2008).

A largo plazo, los contenidos de carbono en el suelo varían grandemente dependiendo del desarrollo del suelo, el grado de meteorización química, y como estos procesos interactúan con los procesos biológicos, que a su vez reciclan nutrientes y elementos esenciales (Doetterl et al., 2018; Kramer & Chadwick, 2016). Así el carbono en el suelo

puede ser fuertemente modificado (degradado o mejorado) en función de cambios en su uso y manejo (corto plazo) (FAO, 2002). En otras palabras, los factores que ejercen los principales controles en las reservas de carbono son el clima y la geoquímica (a largo plazo), mientras que las prácticas agrícolas y cambio del uso del suelo podrían modificarlos a corto plazo (Van Ypersele de Strihou, 2019).

En cuanto a las características climáticas y su influencia en el almacenamiento de carbono se presentan algunas generalidades, como la existencia de una correlación positiva entre el contenido de carbono orgánico y la cantidad de precipitación de una zona (Parton et al., 1987). De forma contraria, se ha demostrado que existe una correlación negativa entre la temperatura y las reservas de carbono, es decir que a mayor temperatura menor será el almacenamiento de este elemento. Por ejemplo, en un ecosistema de páramo debido a las bajas temperaturas que presenta resulta en la acumulación de carbono orgánico en el suelo (Van Ypersele de Strihou, 2019).

Las propiedades del suelo están estrechamente relacionadas con su material original, la profundidad del perfil y el contenido de material pedregoso, pues estos son factores limitantes en el almacenamiento de carbono (García et al., 2007).

En algunos casos la erosión puede ser considerada como una fuente de carbono orgánico en el suelo, pues este se podría acumular en depresiones albergando más carbono (Van Ypersele de Strihou, 2019).

2.4. Importancia de almacenamiento de SOC

El carbono orgánico del suelo contribuye al almacenamiento, disponibilidad y reciclaje de nutrientes de las plantas; la biodiversidad del suelo; y mejora las propiedades físicas-químicas. Estas propiedades contribuyen a mejorar la fertilidad, productividad y rendimiento de los suelos; aumenta la capacidad de retención del agua en el suelo y previene la erosión hídrica. Todos estos procesos llevan a una mejora en la resiliencia al cambio climático (FAO, 2019).

Mientras que los efectos que puede presentar la reemisión del carbono orgánico almacenado en el suelo provocaría un incremento significativo en la concentración de CO₂ de la atmósfera, y por tanto un impacto importante en el cambio climático. En contraste, el secuestro de carbono en el suelo supone una buena manera de compensar las

emisiones antropogénicas provenientes del uso de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo (Van Ypersele de Strihou, 2019).

2.5. Relación Carbono/nitrógeno

La relación C/N es un indicador de la calidad del sustrato orgánico del suelo (calidad del suelo relacionada a su fertilidad), en otras palabras, éste es un índice del grado de mineralización de la materia orgánica (Llorente, 2012). Éste valor indica la tasa de nitrógeno disponible para las plantas. Se considera que la materia orgánica presenta un grado de descomposición aceptable cuando la relación C/N se encuentra entre 10.5 y 11; mientras que valores mayores indican inmovilización del nitrógeno por los microorganismos del suelo, provocando la descomposición lenta de la materia orgánica (Gamarra et al., 2018). Contrario, valores inferiores indican una rápida ruptura de tejidos por la actividad microbiana estimulada por la existencia de nutrientes suficientes para microorganismos y vegetales (Gamarra et al., 2018).

La relación C/N disminuye con la profundidad del suelo, lo que indica que la edad y el estado de descomposición de la materia orgánica son avanzados a mayor profundidad (Van Ypersele de Strihou, 2019).

2.6. Espesor del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono

El espesor del suelo resulta del balance entre las tasas de producción y transporte del suelo, y es un elemento crítico que controla varios procesos hidrológicos y ecológicos tales como la respuesta hidrológica, el tiempo de residencia del agua y determina el almacenamiento y agua disponible para las plantas (Patton et al., 2018). Por otro lado, el efecto combinado de la meteorización física y química afectan el espesor y composición geoquímica del suelo que a su vez determina el almacenamiento de carbono del suelo (Wackett et al., 2018).

En general, se considera que el clima y topografía son los factores principales que controlan las dinámicas del carbono orgánico del suelo. Pero la magnitud y dirección varían significativamente dependiendo, no solamente del tipo de clima y los procesos geomorfológicos, sino también en gran medida del tipo de vegetación. En las laderas, los suelos están sometidos constantemente a la acción de los procesos de erosión y deposición, los cuales afectan el espesor de los suelos y por ende el almacenamiento de



carbono. En condiciones de clima secos con escasa vegetación, los efectos de la topografía en el almacenamiento de carbono y sus interacciones con los minerales están fuertemente asociadas a la posición topográfica (Wang et al., 2018). Por ejemplo, suelo erosionado (principalmente por salpicaduras y flujo) en las partes altas transporta y redistribuye el carbono orgánico del suelo que es re-depositado localmente en las concavidades de las partes bajas de las laderas.

Sin embargo, esta afirmación no siempre es válida y varía en condiciones climáticas frías y húmedas como las que ocurren en los ecosistemas de páramo donde la erosión hídrica es limitada. En los páramos del sur del Ecuador, Molina et al., (2019) demostró que el contenido de carbono orgánico del suelo y el espesor fueron marginalmente significantes entre las posiciones topográficas (alta, media y baja) a lo largo de toposecuencias de suelo. Pero analizando entre tipos de vegetación (bosque, pajonal y almohadillas) el contenido de carbono y el espesor del suelo fueron altamente significantes. Estos resultados han resaltado la importancia del desarrollo del suelo para la acumulación del carbono orgánico y que a su vez co-evoluciona con variables topográficas y de vegetación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

Esta investigación se realizó en la microcuenca de la quebrada Cuevas ($3^{\circ}01'50''\text{S}$, $79^{\circ}17'59''\text{W}$) en un ecosistema de páramo, localizada en la parroquia Baños del cantón Cuenca y pertenece a la zona alta de la cuenca del río Yanuncay; que, a su vez, forma parte de la cuenca hidrográfica del río Paute (Ilustración 3). La microcuenca Cuevas tiene un área de 4.2 km^2 , con un rango altitudinal entre $3\ 608 \text{ m s. n. m.}$ y $3\ 960 \text{ m s. n. m.}$, con pendientes que varían de 5% a 12% en los valles y 12% a 25% en las laderas (Molina et al, 2019).

La precipitación en la microcuenca presenta un régimen bimodal (Mora & Willems, 2012) con una media anual de alrededor 911 mm (ETAPA EP). Entre los meses de enero a mayo se considera la estación lluviosa, en la cual, la lluvia mensual alcanza valores mayores a 100 mm . Mientras que la estación seca ocurre entre los meses de julio a septiembre, con una media mensual de 35 mm . Además de las constantes lluvias, existe un gran aporte de humedad proveniente de nubes y niebla (Molina et al., 2015). La temperatura es relativamente constante durante el año, con una media anual de aproximadamente 8°C (ETAPA EP). Si bien, la temperatura media exhibe una ligera variación estacional, se puede observar una fuerte gradiente diurna, con temperaturas de 18°C en el día y 1°C durante la noche.

Los suelos en la zona de estudio están desarrollados en rocas volcánicas andesíticas de la época del Mio-Plioceno (Beate et al., 2001), las mismas que quedaron expuestas luego de la glaciación del Pleistoceno tardío (Hansen et al., 2003). El tipo de suelo predominante es el Andosol no alofánico a lo largo de la cuenca, sin embargo, Histosoles se encuentran en lugares planos o valles. En estos Andosoles no alofánicos, los horizontes superficiales son pobres en alófanos y minerales de caoliníta pero abundante en complejos orgánico metálicos debido a la meteorización química (Podwojewski & Poulenard, 2000). Al ser los suelos altamente meteorizados están agotados en cationes de base, silicio, y la disponibilidad del fósforo es baja (retención o fijación) (Molina et al., 2019). Además, los suelos son ácidos con un pH menor a 5, la densidad aparente es baja ($< 0.9 \text{ g/cm}^3$) y el contenido de carbón orgánico es alto, que puede llegar inclusive hasta valores del 20% (Molina et al., 2019).



El área de estudio está compuesta por tres tipos de cobertura vegetal. La vegetación predominante es el pajonal (paj) que abarca el 81% del área de la microcuenca Cuevas. La especie dominante es la paja (*Calamagrotis intermedia*) y en menor cantidad la grama blanca (*Paspalum bonplandianum*) (Asanza & Barahona, 2015). Otro tipo de cobertura vegetal importante es almohadilla (alm) que cubre un 17.6% del área de estudio, y está compuesta por las siguientes especies: la grama blanca (*Paspalum bonplandium*) y Plantago (*Plantago rígida*). El tercer tipo de cobertura vegetal es bosque nativo de *Polylepis* que se encuentra en las partes altas en pequeños parches y abarcan una superficie menor al 2% (1.4%) del área de la cuenca. De este último las principales especies son el árbol de papel (*Polylepis reticulata*) Kunth y Tucshi hembra (*Gynoxys miniphilla*) (Asanza & Barahona, 2015).

El área de estudio está fuertemente impactada por las actividades antrópicas como el pastoreo intensivo de animales, principalmente ganado bovino y equino; quemas y agricultura. Estas actividades han causado un deterioro de las propiedades del suelo, y, por consiguiente, poniendo en riesgo ciertos servicios ecosistémicos importantes como la provisión de agua y almacenamiento del carbono en el suelo. Desde el año 2010, el área es propiedad de la Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), la cual se ha comprometido en el cuidado y protección de esta zona de recarga hídrica para la ciudad (Molina et al., 2019). De esta forma según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Azuay Actualizado 2015 -2030, la zona de estudio se encuentra dentro de un Área Protegida Municipal, debido, principalmente, a su importancia en la preservación de las fuentes hídricas (Gobierno Provincial del Azuay, 2015).

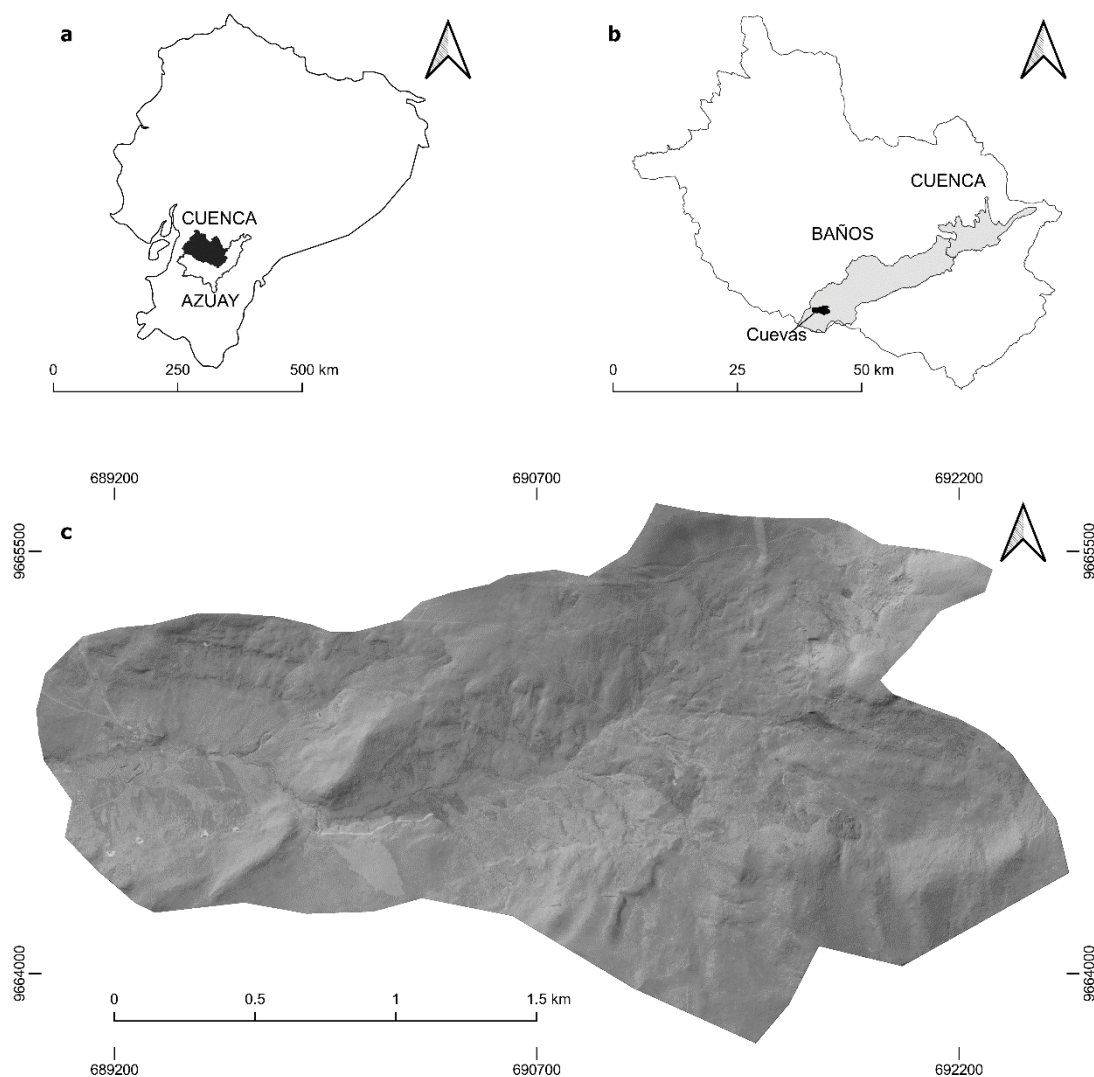


Ilustración 3: Ubicación sitio de estudio. (a) Ecuador continental con ubicación del cantón Cuenca, (b) Mapa del cantón Cuenca y (c) Modelo de Elevación Digital (DEM) de la microcuenca Cuevas.

3.2. Determinación de los puntos de muestreo

La información cartográfica que se utilizó para determinar los sitios de muestreo, fue provista por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, en base a vuelos con drones en el año 2015. La siguiente información fue recopilada:

- Ortofotografía compuesta por las bandas RGB más una banda infrarroja (Ilustración 4a)
- Curvas de nivel
- Límite del área de la microcuenca (contorno)

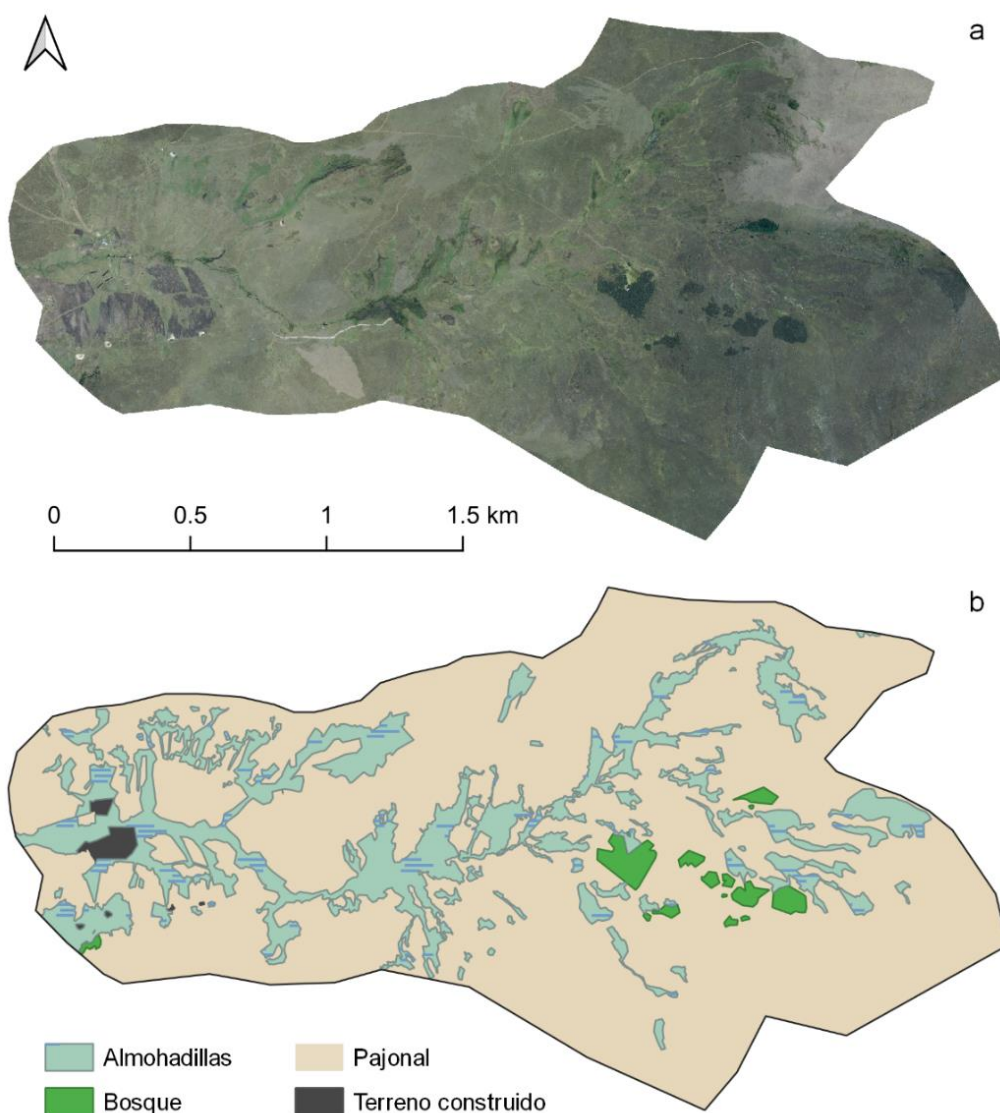


Ilustración 4: (a) Ortofotografía y (b) mapa de cobertura del suelo en la microcuenca Cuevas

Una vez recopilada la información se realizó los siguientes análisis para generar los mapas (Anexo 1).

a Mapa de cobertura vegetal

Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (QGIS versión 3.2.1), se generó una clasificación no supervisada en función de la ortofotografía, delimitando polígonos de los tres tipos de cobertura vegetal de interés: pajonal, almohadilla y bosque (paj, alm y bos). Siendo este un proceso automático que se basa en las estadísticas de la imagen. En la Ilustración 4b se presenta el mapa de cobertura.

b Modelo de elevación digital y mapa de pendientes

Se realizó el modelo de elevación digital (DEM) (Ilustración 5a) basado en las curvas de nivel para obtener un mapa de pendientes mediante el software QGIS v3.2.1. Para lo cual fue necesario, en primer lugar, emplear la función *TIN interpolation* misma que representa la morfología de la superficie, para finalmente elaborar un DEM que permite visualizar de manera rápida y clara las formas del relieve y los elementos presentes en éste. Posteriormente, se categorizaron las características morfológicas del terreno en tres clases: cóncavo, convexo y recto (Ilustración 5b) empleando la herramienta *Terrain Surface Convexity* del software libre SAGA GIS versión 6.4 (Anexo 1).

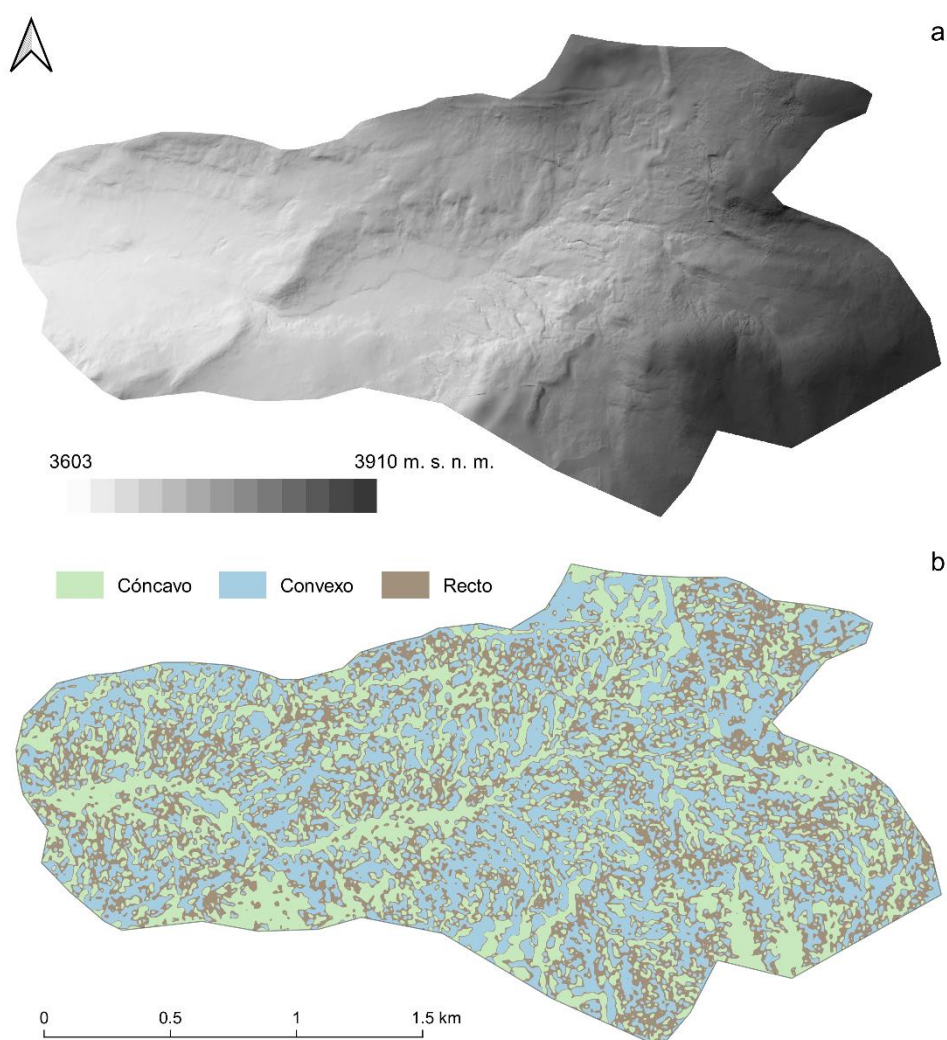


Ilustración 5: (a) Modelo de elevación digital y (b) mapa de morfología del terreno de la microcuenca Cuevas

Una vez elaborados los mapas de cobertura y pendiente, se combinaron estos mediante la herramienta *Intersection* del software QGIS v3.2.1 (Ilustración 6a). De esta forma, se establecieron 9 clases de interés en función de la cobertura vegetal y la topografía: cóncavo almohadilla (cc_alm), convexo almohadilla (cx_alm), recto almohadilla (s_alm), cóncavo pajonal (cc_paj), convexo pajonal (cx_paj), recto pajonal (s_paj), cóncavo bosque (cc_bos), convexo bosque (cx_bos) y recto bosque (s_bos). Finalmente se definieron 15 puntos de muestreo por cada una de las clases (en total 135 puntos) (Ilustración 6b).

A partir de esto, se seleccionaron de forma aleatoria puntos para la toma de muestras para análisis de densidad aparente.

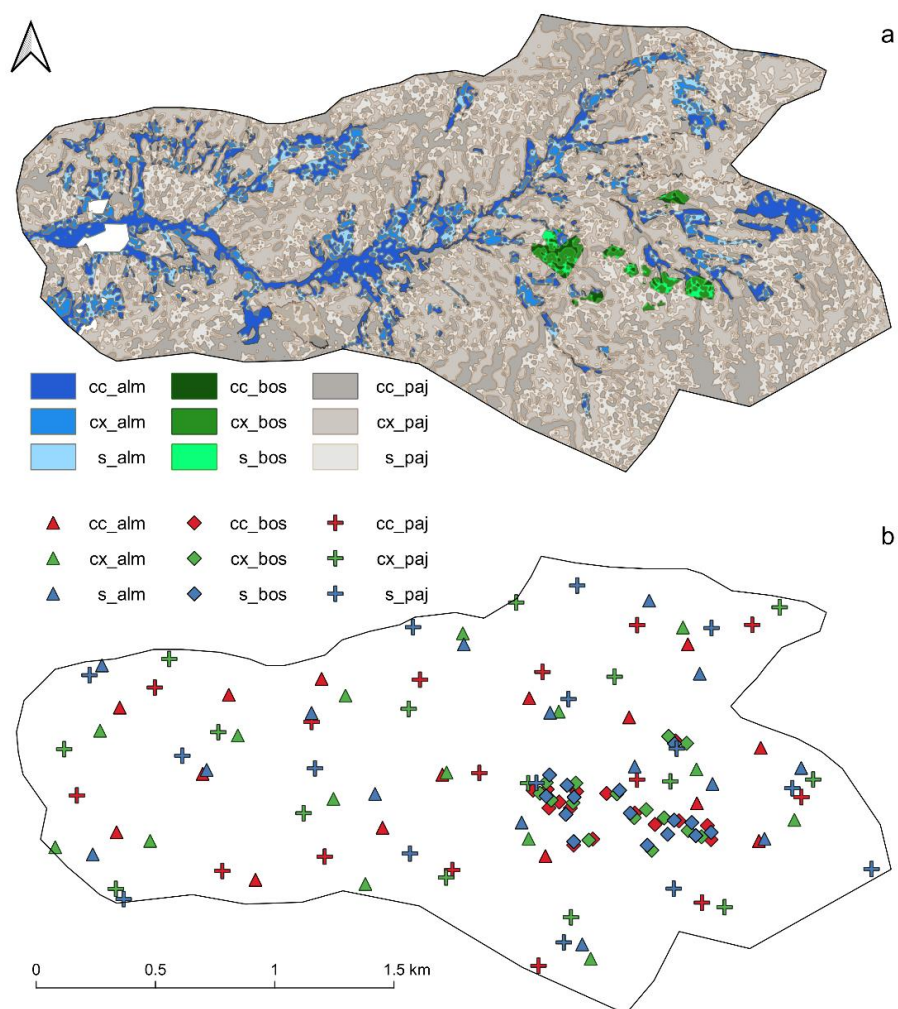


Ilustración 6: (a) Clases definidas en función de cobertura vegetal y topografía, y (b) sitios de muestreo en la microcuenca Cuevas

Abreviaturas: cóncavo almohadilla (cc_alm), convexo almohadilla (cx_alm), recto almohadilla (s_alm), cóncavo pajonal (cc_paj), convexo pajonal (cx_paj), recto pajonal (s_paj), cóncavo bosque (cc_bos), convexo bosque (cx_bos) y recto bosque (s_bos).

3.3. Muestreo

Establecidos los puntos de muestreo, se llevó a cabo una campaña de campo con el objetivo de determinar la profundidad del suelo y la toma de muestras para análisis de la cantidad de carbono orgánico y nitrógeno. Por logística en el desarrollo de esta investigación, la campaña de campo se realizó durante los meses de octubre a diciembre de 2019. Para cada uno de los 135 puntos de muestreo se realizaron las siguientes mediciones: profundidad del suelo hasta el horizonte C y espesor de los horizontes O, A, AC, CA y C (éste último no siempre se encontró).

Además, se tomaron muestras de suelo alteradas (sin necesidad de tomar precauciones para conservar la estructura y humedad) e inalteradas (conservan la estructura y humedad) en los 135 sitios (Anexo 2).

3.3.1. Medición espacial de la profundidad del suelo

Utilizando un barreno de media caña, en cada sitio de muestreo, se midió la profundidad del suelo hasta llegar al horizonte C. Con esta técnica se diferenció cada uno de los horizontes a lo largo de la profundidad y se determinó sus espesores (Ilustración 7). Adicionalmente, en cada sitio de muestreo se determinó la inclinación y dirección de la pendiente empleando un clinómetro y brújula (Anexo 2).



Ilustración 7: Medición del espesor de horizontes del suelo mediante barreno de media caña

3.3.2. Toma de muestras alteradas e inalteradas

En cada punto de muestreo, se procedió a tomar muestras de suelo alteradas de cada horizonte mediante barrenación (barreno Edelman) hasta alcanzar la profundidad del horizonte C o frente meteorizado, las mismas que fueron almacenadas en fundas plásticas y adecuadamente etiquetadas (Guncay, 2015). Por otra parte, en aquellos puntos que fueron seleccionados para la toma de muestras inalteradas, se procedió a tomar tres repeticiones por cada horizonte utilizando anillos de Kopecky (Ilustración 8), los cuales se utilizaron para determinar la densidad aparente.



Ilustración 8: Muestras inalteradas en anillos de Kopecky

3.4. Preparación de muestras y ensayos de laboratorio

3.4.1. Secado y preparación de muestras de suelo

Las muestras tomadas en el campo (alteradas), se colocaron en recipientes de aluminio, luego se las secó a temperatura ambiente en el laboratorio de Hidrofísica del PROMAS (Ilustración 9); una vez secas las muestras del suelo, por cada una de estas se tomó una fracción de suelo seco, las mismas que se molieron en un mortero hasta quedar reducidas

a polvo, luego se colocaron en pequeños frascos de plástico con capacidad de 10 ml. Finalmente, estos frascos se empaquetaron en fundas plásticas de embalaje y enviaron al Departamento de Tierra y Ciencias Ambientales de la Universidad Católica de Lovaina - la Nueva en Bélgica, donde se determinó el contenido de carbono orgánico y nitrógeno (Anexo 3).



Ilustración 9: Secado de las muestras alteradas

3.4.2. Determinación de la densidad aparente

Las muestras inalteradas se perfilaron (eliminando excesos en los extremos de los anillos), pesadas y secadas en el horno a 80 °C por 48 horas (específico para suelos orgánicos) y por 24 horas a 105 °C suelos minerales en el laboratorio del PROMAS. La diferencia de peso húmedo y seco, con el volumen conocido, permite determinar la densidad aparente mediante el método del cilindro de volumen conocido (Castañeda et al., 2013). Por lo tanto, la densidad aparente se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_{s+a} - m_a}{V} \quad (1)$$

donde ρ : densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

m_{s+a} : masa del suelo seco más el anillo (g)

m_a : masa del anillo (g)

V : volumen del anillo (cm^3)

3.5. Análisis químico

Las muestras alteradas, que fueron previamente molidas y envasadas, se utilizaron para determinar el contenido de carbono orgánico, carbono total y nitrógeno total, mediante *Vario MAX CN elemental analyzer*, siendo esta una alternativa más rápida a algunos métodos tradicionales. En este ensayo se siguieron los protocolos establecidos en Pansu & Gautheyrou (2007); y por el Laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Cambridge (s. f.), estos análisis se realizaron en la Universidad Católica de Lovaina -La Nueva en Bélgica.

Este método permite analizar un gran número de muestras a la vez, debido al pesaje en crisoles reutilizables que no requieren tratamiento previo. Mismo se fundamenta en someter a las muestras a combustión a altas temperaturas ($1\ 150\ ^\circ\text{C}$) para el análisis de gases, el cual se ejecuta en pocos minutos.

3.6. Almacenamiento de carbono en el suelo

Una vez que se determinó la cantidad de carbono orgánico presente en las muestras de suelo, se estimó el almacenamiento de carbono en el suelo empleando la densidad aparente y profundidad del suelo, a través de la fórmula propuesta por Tonneijck et al. (2010):

$$TCS_d = \sum_{i=1}^{i=k} b\rho_{s,i}C_iD_i(1 - S_i) \quad (2)$$

donde k = el número de capas hasta la profundidad, d (m),

TCS_d = almacenamiento de COT (kg m^{-2}) sobre la profundidad d ,



$b\rho_{s,i}$ = densidad aparente en el suelo (kg m^{-3}) de la capa i ,

C_i = fracción del carbono de la capa i (kg kg^{-1}),

D_i = espesor de la capa i (m), y

S_i = fracción de fragmentos >2 mm en la capa i (kg kg^{-1}).

Para este cálculo se consideraron los horizontes O, A, AC, y CA de cada perfil de suelo, pues estos representan la acumulación de carbono orgánico producto de procesos actuales de formación de suelo, por lo tanto, se excluyó al horizonte C, pues el mismo constituye parte del lecho rocoso y no corresponden a procesos actuales de almacenamiento (Tonnejck et al., 2010).

3.7. Análisis estadístico

Una vez obtenida la cantidad de carbono orgánico y nitrógeno en el laboratorio, y las variables analizadas en campo, se elaboró una base de datos para realizar el análisis estadístico. En primer lugar, se realizó un análisis estadístico descriptivo o exploratorio, a través de diagramas de caja mediante el software libre R Studio 3.6.2, que permitieron explorar las diferencias entre clases y por grupo mediante la visualización de valores máximos, mínimos y la mediana de cada grupo (Anexo 5).

Además, se realizó un análisis previo de la relación entre las variables a través de una matriz de correlación, usando la función `pairs.panels` del software RStudio, la misma que incorpora en un único gráfico la distribución de los datos de cada variable mediante histogramas (diagonal central), dispersión bi-variados (debajo de la diagonal) y la correlación de Pearson (sobre la diagonal).

Para el análisis estadístico se definió el número de grupos y observaciones, de esta forma se identificó si se trata de un modelo equilibrado (mismo número de observaciones por grupo) o no equilibrado (el número de observaciones por grupo es diferente) (Amat, 2016a).

Simultáneamente, se analizó los datos para identificar si presentan una distribución “normal”, para esta actividad se emplearon dos métodos para corroborar la información. En primer lugar, se realizaron histogramas para observar de forma gráfica la distribución

de los datos con cada una de las variables de interés. Para reafirmar esto, se empleó la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk (Parada, 2019). Las hipótesis estadísticas que maneja esta prueba son las siguientes:

- Hipótesis nula: la variable presenta una distribución normal ($p \text{ valor} > \alpha$)
- Hipótesis alternativa: la variable presenta una distribución no normal ($p \text{ valor} < \alpha$)

Dónde α representa la significancia, misma a la que se le ha asignado un valor de 0.05 lo que indica un riesgo del 5% de suponer la existencia de una diferencia cuando la misma no es real.

Los grupos que presentaron distribución normal se analizaron los datos mediante ANOVA de una vía (análisis de la varianza de un factor). Esta herramienta estadística permite evaluar las medias de diferentes grupos a través del estudio de las varianzas (Amat, 2016a). De esta forma, esta prueba compara la varianza entre las medias de los grupos (intervarianza) frente a la varianza promedio dentro de los grupos (intravarianza). Esta prueba maneja las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: las medias de los grupos son iguales
- Hipótesis alternativa: no todas las medias de los grupos son iguales, al menos una de las medias es distinta.

En caso de que exista diferencia entre los grupos, la prueba de ANOVA de una vía no indica qué grupo difiere de cual, por lo que el post- hoc Tukey requiere ser aplicado. Este es un procedimiento de comparaciones múltiples entre todas las parejas de medias (Villalpando et al., 2001). Mediante el software RStudio se empleó la función Tukey HSD, misma que resulta conveniente cuando se presenta un diseño equilibrado, es decir, que existe mismo número de observaciones en todos los grupos analizados. Cuando el valor obtenido es menor al nivel de significancia establecido, se considera que la diferencia entre las medias es significativa (Amat, 2016b).

Mientras que los datos que presentaron distribución no normal (prueba de Shapiro – Wilk), se analizaron a través de pruebas no paramétricas, las cuales emplean la mediana como dato de centralización, pues el valor de “x” está el 50% de las veces por debajo y 50% por encima de esta. Para este análisis se empleó el software RStudio para la

ejecución de la prueba estadística de Kruskal - Wallis, misma que no asume la normalidad de los datos, siendo esta la versión no paramétrica del ANOVA de una vía (asume normalidad). Esta prueba se emplea para evaluar la diferencia entre tres o más grupos muestreados en una sola variable continua (McKight & Najab, 2010). Dado que la variable de interés no presenta distribución normal de sus datos, sería incorrecta la comparación de sus medias grupales, por lo que se comparan rangos (esta es una extensión de la prueba de Mann – Whitney – Wilcoxon). Esta prueba asume que: 1) Los datos provienen de un grupo aleatorio de observaciones; 2) la variable dependiente es ordinal; 3) la variable independiente es nominal con al menos dos categorías; 4) las observaciones son independientes dentro de cada grupo y entre los grupos; 5) no hay medidas repetidas (Gómez et al., 2003) (Anexo 5).

La prueba de Kruskal-Wallis permite conocer si existen diferencias entre los grupos analizados, mas no qué grupos difieren de cuáles. Con este fin, se procedió a realizar la prueba post-hoc de Dunn con los grupos que rechazaron la hipótesis nula, en el cual se realiza la comparación múltiple por pares no paramétrico más apropiado y común para la prueba de Kruskal-Wallis (Dinno, 2015), a través de la función `dunnTest` contenida en el paquete FSA (Ogle et al., 2020) (Anexo 5).

Cuando se realizan varias pruebas estadísticas dependientes o independientes simultáneamente, es posible que se generen falsos positivos, es decir, rechazar la hipótesis nula verdadera, conocido como error de tipo I (Abdi, 2010). Para contrarrestar este efecto, se utilizó el método de ajuste de Bonferroni o corrección Bonferroni, cuya función es reducir los valores críticos de p para cada prueba, en función del número de pruebas a realizar, generalmente, para reducir los problemas asociados con comparaciones múltiples (Cabin & Mitchell, 2000; Garamszegi, 2006).



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez concluida la campaña de campo, se procedió a realizar el análisis de las muestras recolectadas (Anexo 1), estos datos se presentan de forma sintetizada en la Tabla 2, en la que se indica el valor promedio para cada clase: porcentaje de carbono de cada uno de los horizontes de los sitios muestreados, densidad aparente, y de esta forma el almacenamiento de carbono total en el suelo (TCS). El valor de TCS se calculó en función de la profundidad hasta alcanzar el horizonte C o hasta llegar a material parental, es decir, no se consideró el horizonte C para el cálculo de TCS pues el mismo presenta cantidades reducidas de carbono.

A continuación, mediante diagramas de caja se observa de manera clara valores máximos, mínimos, medianas, cuartiles y valores atípicos de profundidad, TCS y porcentaje de carbono en el horizonte A. Seguido se presenta una matriz de correlación de las variables analizadas, misma que refleja aspectos interesantes entre estas. Finalmente, para la ejecución del análisis estadístico preliminarmente se realizó la prueba de Shapiro Wilk para cada una de las clases estudiadas, misma que derivó en pruebas paramétricas y no paramétricas tales como ANOVA de una vía y Kruskal Wallis, respectivamente, y posteriormente post hoc acorde a las pruebas realizadas.



Tabla 2: Características físicas y químicas de sitios de muestreo

Espesor A= espesor del horizonte A (m); Prof. C= profundidad hasta alcanzar el horizonte C o material parental (no incluye el horizonte C) (m); DA= densidad aparente (g/cm^3); %C= porcentaje de carbono orgánico; TCS= Almacenamiento de carbono total (kg/m^2), C/N prom= valor promedio de relación C/N por perfil. Letra O refiere a horizonte O; letra A refiere a horizonte A; AC refiere a horizonte de transición AC; CA refiere a horizonte de transición CA.

Código	Espesor A	Prof. C	DA O	DA A	DA AC	DA CA	%C O	%C A	%C AC	%C CA	TCS	C/N prom
CC_ALM	0.31	0.59	0.20	0.45	1.11	1.10	24.48	11.79	6.48	2.57	27.53	14.13
CX_ALM	0.36	0.79	0.15	0.42	1.13	1.10	24.48	13.54	5.40	4.14	39.84	13.84
S_ALM	0.27	0.61	0.20	0.68	0.68	0.98	24.96	12.40	10.26	1.94	35.45	13.57
CC_BOS	0.26	0.45	0.40	0.76	1.20	1.06	17.58	13.56	NA	6.12	37.34	14.75
CX_BOS	0.34	0.50	0.47	0.58	1.16	0.82	17.95	13.61	5.29	NA	38.74	15.11
S_BOS	0.29	0.55	0.51	0.66	1.19	1.20	17.95	13.46	7.53	2.63	47.06	15.55
CC_PAJ	0.28	0.46	0.54	0.62	1.14	1.16	13.65	10.23	3.60	4.29	28.31	14.74
CX_PAJ	0.34	0.48	0.63	0.59	0.92	1.20	14.04	9.20	3.98	2.00	26.91	14.79
S_PAJ	0.31	0.51	0.37	0.64	1.09	1.00	12.78	10.07	3.88	3.70	27.08	15.20
Mínimo	0.03	0.15	0.08	0.12	0.68	0.72	7.4	1.31	1.69	1.36	10.49	10.70
Máximo	0.94	1.36	0.63	0.96	1.30	1.4	28.21	25.48	19.02	9.01	126.83	21.34
Media General	0.31 \pm 0.13	0.55 \pm 0.22	0.38 \pm 0.18	0.6 \pm 0.19	1.05 \pm 0.52	1.08 \pm 0.45	18.65 \pm 5.73	11.99 \pm 5.01	5.62 \pm 2.83	3.42 \pm 1.44	34.25 \pm 18.75	14.63 \pm 1.66
Media \pm Desviación estándar por vegetación y topografía												
Almohadilla (ALM)	0.31 \pm 0.15	0.66 \pm 0.24	0.18 \pm 0.09	0.52 \pm 0.18	0.98 \pm 0.51	1.05 \pm 0.5	24.64 \pm 4.36	12.58 \pm 6.14	6.89 \pm 3.91	2.75 \pm 1.23	34.27 \pm 23.32	13.85 \pm 1.96
Bosque (BOS)	0.30 \pm 0.15	0.5 \pm 0.22	0.46 \pm 0.08	0.67 \pm 0.21	1.18 \pm 0.51	1.07 \pm 0.35	17.83 \pm 2.64	13.55 \pm 4.76	6.41 \pm 2.33	4.37 \pm 1.51	41.05 \pm 19.32	15.14 \pm 1.40
Pajonal (PAJ)	0.31 \pm 0.1	0.48 \pm 0.13	0.51 \pm 0.13	0.62 \pm 0.14	1.05 \pm 0.52	1.11 \pm 0.49	13.49 \pm 3.06	9.84 \pm 2.93	3.8 \pm 1.72	3.52 \pm 1.58	27.43 \pm 7.66	14.91 \pm 1.26
Cóncavo (CC)	0.28 \pm 0.13	0.5 \pm 0.2	0.38 \pm 0.16	0.61 \pm 0.2	1.14 \pm 0.49	1.12 \pm 0.48	18.57 \pm 5.53	11.86 \pm 4.41	4.84 \pm 2.14	4.32 \pm 1.84	31.06 \pm 16.51	14.54 \pm 1.86
Convexo (CX)	0.35 \pm 0.17	0.59 \pm 0.26	0.42 \pm 0.21	0.53 \pm 0.21	1.07 \pm 0.53	1.09 \pm 0.37	18.82 \pm 5.38	12.12 \pm 5.8	5.02 \pm 2.6	3.07 \pm 1.07	35.16 \pm 22.4	14.74 \pm 1.34
Recto (S)	0.29 \pm 0.11	0.55 \pm 0.18	0.36 \pm 0.14	0.66 \pm 0.11	0.96 \pm 0.48	1.03 \pm 0.47	18.56 \pm 6.44	11.98 \pm 4.86	6.89 \pm 3.59	2.88 \pm 1.3	36.53 \pm 17.09	14.77 \pm 1.70

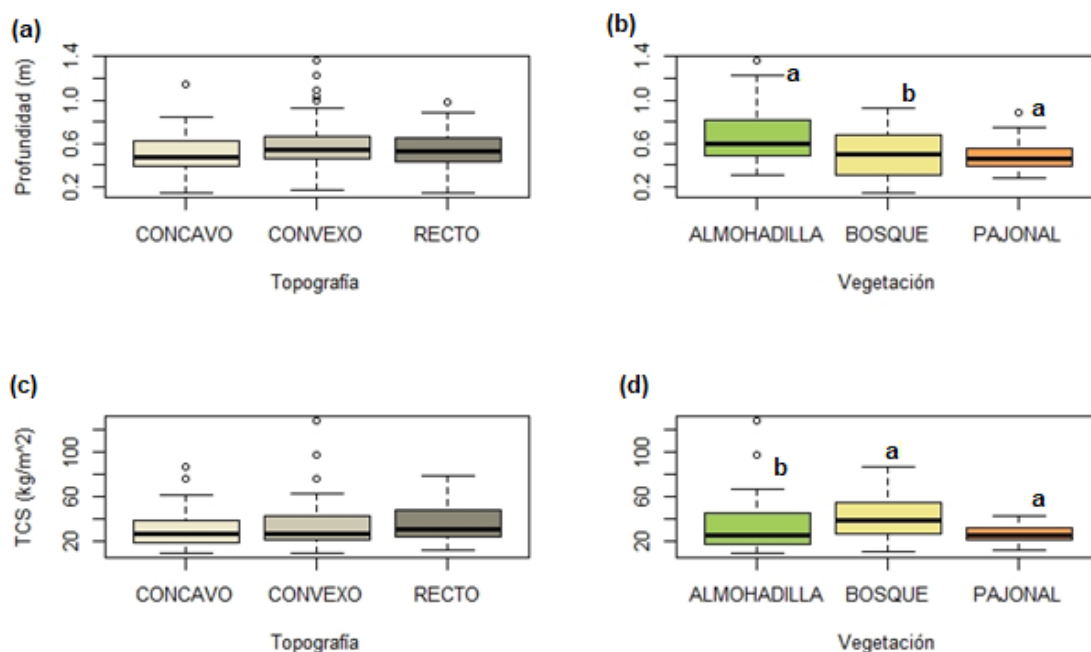


Ilustración 10: Diagramas de caja. (a) Topografía vs profundidad (b) vegetación vs profundidad (c) Topografía vs TCS y (d) vegetación vs TCS

Nota: Diferente letra indica que son significativamente diferentes

4.1. Variación en el espesor del suelo y contenido de carbono orgánico con la topografía y vegetación

Los ecosistemas de páramo están compuestos por laderas abruptas cubiertas de diferentes tipos de vegetación. Las mediciones del espesor del suelo hasta el horizonte C varían desde 0.15 a 1.36 m con un valor promedio de 0.55 ± 0.22 m (Tabla 2). Por la posición topográfica, los suelos más profundos se localizaron en zonas convexas (CX), en promedio de 0.59 ± 0.26 m. A pesar de aquello, las medianas de los tres grupos de las posiciones topográficas son similares y, por lo tanto, las diferencias no son significativas (Ilustración 10). Contrario a la posición topográfica, se observa una diferencia significativa en la variabilidad de la profundidad del suelo bajo las diferentes coberturas vegetales. Los suelos más profundos se observan bajo la vegetación de almohadillas (ALM), en promedio 0.66 ± 0.24 m, mientras que el espesor del suelo bajo vegetaciones de bosque (BOS) y pajonal (PAJ) varían entre 0.50 ± 0.22 m y 0.48 ± 0.13 m (Tabla 2) en promedio, respectivamente. Los horizontes A presentan mayores espesores en las diferentes configuraciones topográficas y coberturas vegetales, comúnmente siendo el horizonte O el segundo de mayor espesor.

Los valores de espesor del suelo en Cuevas difieren de los encontrados por Molina et al. (2019), cuyas mediciones fueron obtenidas de perfiles de suelo localizadas en la parte alta, media y baja de la microcuenca. El estudio realizado por Molina et al. (2019) reveló que los suelos con menor espesor se encontraron bajo la vegetación de almohadilla, en promedio 0.42 ± 0.06 m, mientras que bajo bosque y pajonal presentaron valores promedio de 0.61 ± 0.17 y 0.65 ± 0.19 m respectivamente. Sin embargo, una de las razones que explica porque el espesor del suelo bajo la vegetación de almohadilla es la más profunda en este estudio refiere a la variación espacial del muestreo. Mientras que en Molina et al. (2019) los perfiles de suelo fueron realizados a lo largo de la ladera, en esta investigación las mediciones del espesor del suelo incluyeron la zona plana del valle que, generalmente, tiene suelos más profundos que las pendientes siendo la vegetación predominante en estas zonas las almohadillas.

El análisis de correlación de Pearson reveló que existe una correlación positiva alta ($r=0.61$) entre la profundidad del suelo y el almacenamiento total de carbono (TCS), es decir, entre mayor sea la profundidad del perfil mayor será el almacenamiento de carbono en el suelo (Ilustración 11). Estos resultados coincide con lo planteado por Cunalata et al (2013), que determinaron que el contenido en carbono orgánico total aumenta con la profundidad en páramos de las comunidades de Shobol Llinllín y Chimborazo. Esta relación es cierta siempre y cuando se considere la profundidad total del suelo, mas no el espesor individual de cada horizonte, el %C es mayor en los primeros horizontes y disminuye en los horizontes AC y CA, similar a lo encontrado por Dick et al. (2005), quienes determinaron que la mayor cantidad de carbono orgánico se encontraba en los horizontes A y AB.

Además, se encontró una correlación positiva baja de la profundidad con respecto a la relación C/N ($r= 0.30$). De esta forma se observó una relación lineal entre la profundidad con el almacenamiento total de carbono y, a su vez, de la primera con la relación C/N. Contrario a esto, la matriz de correlación indicó una relación casi nula entre la densidad aparente y la profundidad del suelo (Ilustración 11).

A través de la prueba de Shapiro Wilk se evaluó la distribución de datos de topografía y vegetación con respecto a la profundidad (Ilustración 11), misma que demostró la existencia de distribuciones no normales (Tabla 3), que orientó el análisis del estudio a pruebas no paramétricas tal como la prueba de Kruskal Wallis. Es importante destacar

que, aunque se presentaron distribuciones normales en la mayoría de casos analizados, la existencia de distribuciones no normales obligó al uso de pruebas no paramétricas en el estudio estadístico.

Tabla 3: Resultados de prueba de Shapiro Wilk para determinar la tendencia en la distribución de datos TCS= Almacenamiento de carbono total (kg/m²); Espesor_A= espesor del horizonte A (m); %C_A= porcentaje de carbono en el horizonte A (%)

Parámetros	Topografía			Vegetación		
	Cóncavo	Convexo	Recto	Pajonal	Almohadilla	Bosque
Profundidad (m)	0.1705	0.0037	0.4758	0.1279	0.0010	0.3299
TCS (kg/m ²)	0.0006	8.70 E-07	0.0044	0.4091	3.12 E-06	0.1857
Espesor_A (m)	0.2395	0.0018	0.2746	0.0717	5.46 E-06	0.3946
%C_A (%)	0.7114	0.0558	0.6505	0.7195	0.0947	0.9425

Nota: p value > 0 = a 0.05 presentan distribución normal, caso contrario, valores inferiores distribución no normal. Basta con que una de las distribuciones no sea normal para recurrir a pruebas no paramétricas. Se indica con negrita los valores correspondientes a distribución normal

Estadísticamente, se observó que existe una fuerte influencia de la vegetación sobre la profundidad ($p = 0.005$), pues se identifica diferencias significativas en las combinaciones de cobertura vegetal de almohadilla vs bosque y almohadilla vs pajonal (Tabla 4); mientras que respecto a las distintas configuraciones topográficas no se observó influencia significativa en ninguna de éstas (Tabla 4).

Analizando solamente los resultados del horizonte A, se observó una correlación positiva alta ($r = 0.61$) entre el espesor del horizonte A con respecto a la profundidad total de los perfiles analizados (Ilustración 11), dado que el horizonte A representa más del 50% de la profundidad total de los perfiles a excepción de las zonas de almohadilla en las que el horizonte A representa el 47% de la profundidad total.

De igual forma se apreció una correlación positiva moderada ($r = 0.50$) (Ilustración 11) entre las variables profundidad y almacenamiento de carbono total, consecuencia directa de la relación existente entre el primer parámetro y el porcentaje de carbono contenido en este horizonte. De esta forma se presentó una relación lineal entre el almacenamiento de carbono total y el espesor del horizonte A (Ilustración 11). Finalmente, se evaluó la correlación del horizonte A y el porcentaje de carbono, indicando una relación positiva baja, casi nula.

La prueba de Shapiro Wilk demostró la necesidad de emplear pruebas no paramétricas al evaluar el espesor del horizonte A vs topografía, y vegetación; producto de distribuciones no normales en ambas categorías (Tabla 3). Posteriormente, la prueba de Kruskal Wallis indicó que la vegetación y la topografía ejercen similar efecto sobre el espesor del horizonte A, además de que no existen diferencias significativas entre las diferentes coberturas vegetales y posiciones topográficas en función del post hoc Dunn (Tabla 4).

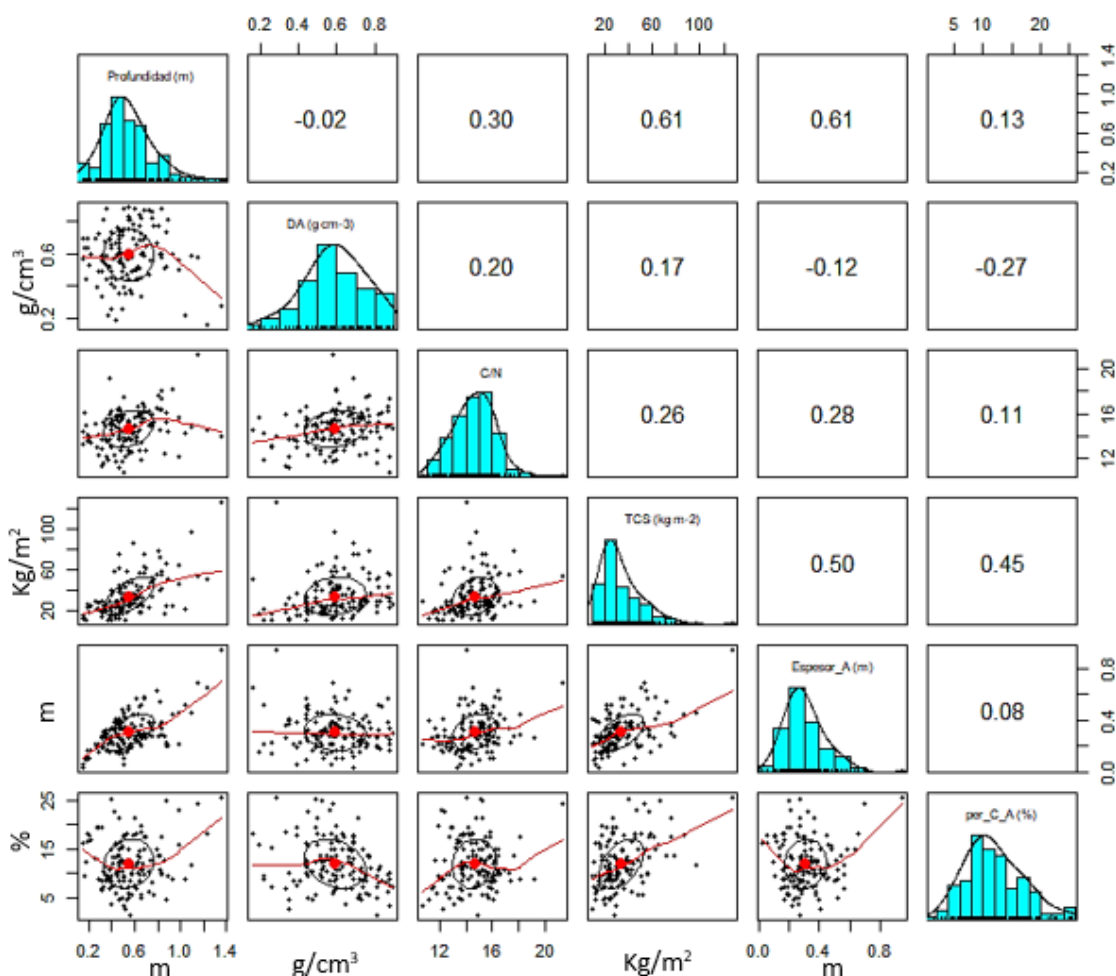


Ilustración 11: Correlación de las variables, diagonal central indica histogramas de distribución de datos de cada variable, dispersión bi-variados (debajo de la diagonal) y valores de correlación de Pearson se localizan sobre diagonal central

Nota: DA= densidad aparente; C/N= relación carbono/nitrógeno; TCS= almacenamiento de carbono total; Espesor_A= espesor del horizonte A; per_C_A= porcentaje de carbono orgánico en el horizonte A.

4.2. Variación en la concentración del carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico en el horizonte A varió de 1.31 a 25.48% con un promedio de $11.99 \pm 5.01\%$, significativamente mayor al presentado por los horizontes AC y CA (Tabla 2). El porcentaje de carbono (%C) en el horizonte A varía de forma similar entre los tres grupos de topografía y no son significativamente diferentes. Las zonas convexas presentan mayor cantidad de carbono con una media de $11.98 \pm 4.86\%$ dándose así una relación directa entre la profundidad y el almacenaje de carbono. Contrario a lo visto en la topografía, la vegetación presenta variaciones significativas de %C entre los grupos de cobertura vegetal (Ilustración 13), con valores más altos en suelos forestales con una media de $13.55 \pm 4.76\%$, seguido por suelos de almohadilla ($12.58 \pm 6.14\%$) y pajonal ($9.84 \pm 2.93\%$) (Tabla 2). Además del carbono, se observa que la densidad aparente de los horizontes A presenta valores más bajos que los horizontes AC y CA, con un promedio de $0.6 \pm 0.19 \text{ g/cm}^3$.

Como lo menciona (Burbano, 2018), en los suelos de páramo el contenido de carbono presente en el suelo disminuye con la profundidad, existiendo mayor concentración entre los primeros 20 a 30 cm; consecuentemente, estos resultados concuerdan con el alto contenido de carbono orgánico registrado en la microcuenca Cuevas. De la misma forma, este estudio indica concordancia con lo expuesto en varias investigaciones relacionadas a un mayor contenido de carbono en zonas forestales, las cuales indican que el 50% del carbono se encuentra en los primeros 40 cm de profundidad (Pérez et al., 2013), un hallazgo similar al observado en esta área de estudio a pesar de tratarse de zonas menos profundas.

Un estudio realizado por Rodríguez (2004) indica que los Andosoles presentan un alto contenido orgánico, provocando horizontes superficiales húmicos de color oscuro, esto producto de que la materia orgánica contenida en ellos se estabiliza por minerales como alófanos, imogolita, ferrihidrita y complejos orgánico – metálicos, entre otros; que presentan superficies con carga variable capaces de adsorber las moléculas orgánicas.

El almacenamiento de carbono total en el suelo presentó una correlación positiva con respecto al porcentaje de carbono en el horizonte A, mientras que se observó una relación inversa con la densidad aparente, esta relación se ha demostrado en varios estudios (Castañeda et al., 2013; Martínez et al., 2008). A mayor materia orgánica mayor será la

porosidad del sustrato. Por lo tanto, a mayor densidad aparente menor será el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) (Castañeda et al., 2013). En la microcuenca Cuevas la densidad aparente de los diferentes horizontes varió en función de la profundidad y la composición química y estructural del suelo. Los horizontes O y A, caracterizados por un mayor contenido de materia orgánica tienen un valor medio de $0.38 \pm 0.18 \text{ g/cm}^3$ y $0.60 \pm 0.19 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. El valor de densidad aparente no varió significativamente con respecto a la posición topográfica, pero difirieron considerablemente con respecto a la cobertura vegetal del suelo, particularmente las zonas cubiertas por almohadillas que generalmente se encuentran saturadas la mayor parte del año, con un valor de densidad aparente bajo ($0.18 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$) en relación a las otras coberturas (Tabla 2). Mientras que los horizontes AC y CA son más densos con valores medios de $1.05 \pm 0.52 \text{ g/cm}^3$ y $1.08 \pm 0.45 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, sin variaciones significativas relacionadas a la cobertura vegetal o posición topográfica. Sin embargo, a pesar que existen características comunes para suelos de páramo andino, estos suelen diferir en varias particularidades según su ubicación geográfica. Por ejemplo, en la parte norte del país, los suelos desarrollados en depósitos de ceniza volcánica suelen ser negros, profundos, porosos y con densidad baja, producto del continuo aporte de material volcánico que se incorpora a este. Estas características pueden ser más pronunciadas en suelos de turberas como se demuestra en un estudio realizado en el Parque Nacional Cayambe Coca y en la Reserva Ecológica Antisana (noreste Ecuador), en el que determinó que la densidad aparente promedio en los primeros centímetros de profundidad era de 0.21 g/cm^3 , mientras que en los suelos minerales era de 0.58 g/cm^3 (Hribljan et al., 2016). Valores bastante inferiores a los obtenidos en la microcuenca Cuevas situada al sur del país.

Contrario a la densidad aparente, los datos obtenidos en las diferentes configuraciones topográficas y coberturas vegetales indican una distribución normal con respecto al porcentaje de carbono en el horizonte A (Tabla 3), las cuales se evaluaron mediante pruebas paramétricas (ANOVA de una vía). Los resultados se indican a continuación.

Estadísticamente el efecto de la vegetación ($p \text{ value}=0.0010$) sobre el almacenamiento de carbono es más pronunciado que el efecto de la topografía ($p \text{ value}= 0.971$), indicando diferencias significativas en la combinación de almohadillas vs pajonales, y bosque vs pajonal mediante el post hoc Tukey del software R Studio (Tabla 6). Este resultado podría

parcialmente explicarse por el hecho de que la principal fuente de materia orgánica y, por lo tanto de carbono, proviene de plantas y raíces a través de la descomposición de estos, incorporándose continuamente a los horizontes superficiales (Llambí et al., 2012).

Tabla 4: Resultados de prueba no paramétrica Kruskal Wallis para tipo de vegetación y posición topográfica, comparación entre grupos a través de prueba post-hoc Dunn.

Variables	Efecto topografía	Comparación posthoc (p<0.05)			Efecto vegetación	Comparación posthoc (p<0.05)		
	p value	CC vs CX	CC vs RC	CX vs RC	p value	ALM vs BOS	ALM vs PAJ	BOS vs PAJ
Profundidad (m)	0.1956	-	-	-	0.0005	Sí	Sí	No
TCS (kg/m²)	0.2058	-	-	-	0.0027	Sí	No	Sí
Espesor_A (m)	0.1739	-	-	-	0.6450	-	-	-

Nota: CC= cóncavo; CX= convexo; RC= recto; ALM= almohadilla; BOS= bosque; PAJ= pajonal; Espesor A= espesor del horizonte A

Para una mejor comprensión del almacenamiento del carbono en el suelo es importante analizar la relación carbono/ nitrógeno (C/N) el cual es un indicador de la cantidad de desechos vegetales descompuestos y la intensidad de los procesos de transformación microbiana (descomposición lenta o rápida). Los resultados de este estudio muestran que la relación C/N es mayor en suelos formados bajo la vegetación de bosque con un promedio de 15.4 ± 1.40 , este valor indica que existe una limitación reducida de la movilización del nitrógeno producto de los microorganismos del suelo (Solórzano, 2020), lo que concuerda con el porcentaje de carbono más elevado en el suelo bajo esta cobertura boscosa en comparación con las coberturas de pajonal y almohadilla, pero no son significativas. Mientras que, de manera general, el valor C/N en el suelo es similar en las diferentes configuraciones topográficas (Tabla 2).

Tabla 5: Correlación entre C/N y TCS para cada clase de vegetación

Parámetro	TCS_ALM	TCS_BOS	TCS_PAJ
C/N	0.36	0.21	0.09

Nota: C/N= relación carbono/nitrógeno; TCS= Almacenamiento de carbono total; ALM= almohadilla; BOS= bosque; PAJ= pajonal

Al analizar la relación C/N respecto al almacenamiento de carbono total (TCS) en las diferentes coberturas vegetales de suelo, se determinó que existe correlación baja de este parámetro vs TCS en suelos con cobertura de almohadilla y bosque; mientras que para

suelos cubiertos de pajonal la relación fue muy baja, casi nula (Tabla 5). A pesar de que se observó valores similares de C/N en las tres clases de cobertura vegetal (Tabla 2), la razón que explica este fenómeno se relaciona con la existencia de diferencias evidentes en el contenido de carbono, y por ende de TCS en los tres tipos de cobertura vegetal. Pues las zonas con cobertura boscosa y de almohadilla presentaron mayor contenido de carbono almacenado que los suelos cubiertos de pajonal. Esto concuerda con lo encontrado por Madrigal et al. (2019) en Andosoles, en el que explica la existencia de mayor concentración de carbono y nitrógeno en suelos de zonas boscosas con respecto a pastos.

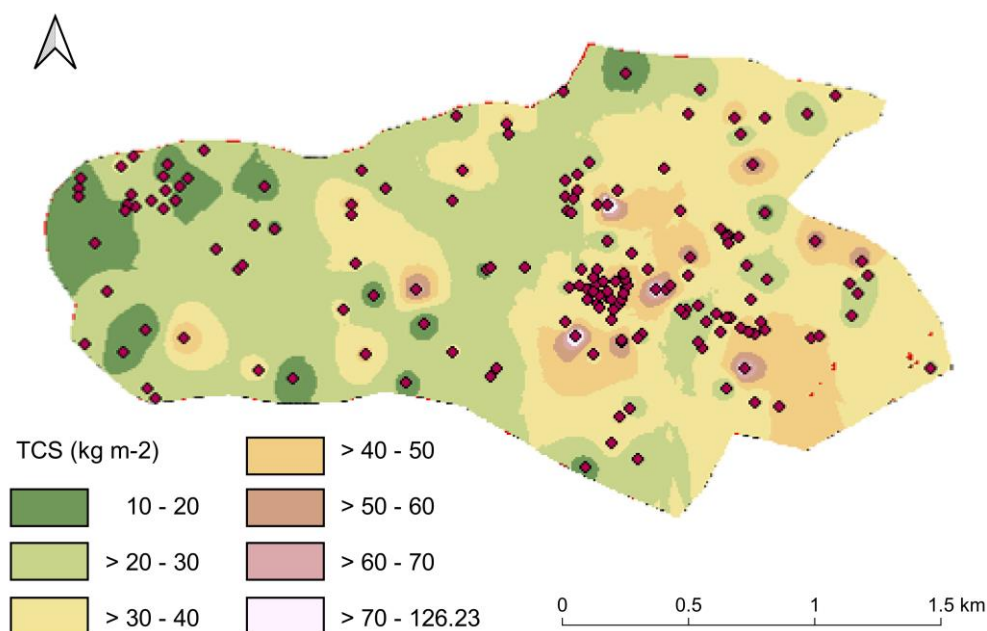


Ilustración 12: Interpolación espacial de almacenamiento de carbono total (TCS) en kg/m²

Nota: Ilustración 4b indica exactamente el mapa de uso de la cobertura

Sin embargo, para almohadillas es menos claro, una posible causa de la acumulación de carbono se debe a condiciones hidrológicas, al ser zonas saturadas la lixiviación del carbono disuelto es baja por lo tanto queda retenido en las capas superficiales del suelo.

Tal como se indica en la Ilustración 12 los sitios que presentan mayor acumulación de carbono se encuentran, principalmente, en la zona alta de la microcuenca, específicamente en zonas aisladas cubiertas por bosques. Mientras que en la parte baja (zonas de acumulación hídrica) la cantidad de carbono almacenado es inferior, encontrándose en un rango entre 10 y 30 kg/m², lo cual coincide con una lenta

descomposición de la materia orgánica al propiciarse un ambiente anaerobio (Cunalata et al., 2013; Roa & Brown, 2016).

Además, se identificó correlación positiva muy baja ($r= 0.17$) entre la densidad aparente del suelo y el almacenamiento de carbono total (Ilustración 11).

Mediante la prueba de Shapiro Wilk se determinó que tanto para la topografía como la vegetación se requería un análisis estadístico de pruebas no paramétricas, esto se derivó del análisis de la distribución de los datos (Ilustración 11) que indicó que los datos no presentaban una distribución normal en ninguna de las configuraciones topográficas con respecto al almacenamiento de carbono total (Tabla 3). La situación fue similar en el caso de la vegetación al presentarse una distribución no normal en la cobertura de almohadilla (Tabla 3).

De igual forma que en la profundidad, se observa que la vegetación ejerce un efecto significativo sobre el almacenamiento de carbono ($p = 0.0027$), más pronunciada que la topografía ($p = 0.2058$). Estas diferencias estadísticamente significativas se observan principalmente entre las combinaciones de almohadilla vs bosque y bosque vs pajonal (Tabla 4).

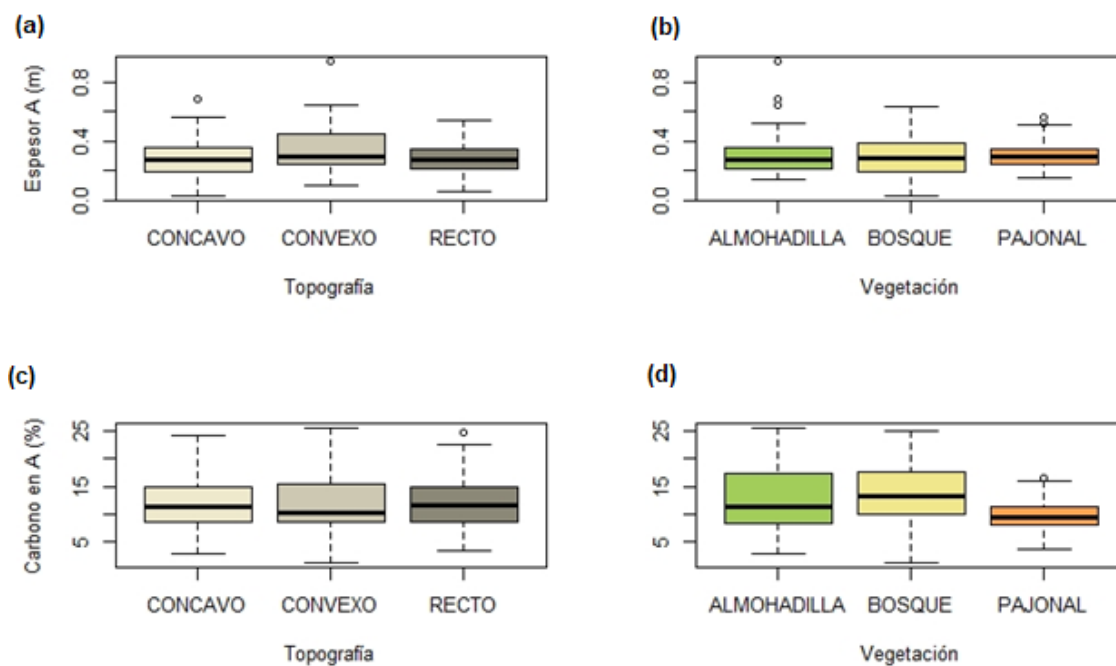


Ilustración 13: Diagramas de caja de (a) Topografía vs espesor del horizonte A (m); (b) Vegetación vs espesor del horizonte A (m); (c) Topografía vs carbono en el horizonte A (%); (d) Vegetación vs carbono en el horizonte A (%)

4.3. Espesor del suelo a lo largo de una gradiente topográfica y de vegetación

En ecosistemas húmedos y fríos como los páramos el espesor del suelo desempeña un control importante sobre varios procesos, entre los principales, los hidrológicos y geomorfológicos. A escalas de paisaje comúnmente se asume que el espesor del suelo es heterogéneo en espacio y tiempo, e inversamente proporcional con las tasas de erosión. Estas suposiciones se cumplen principalmente en regiones áridas y semiáridas con laderas desprovistas o inexistentes de vegetación. En estos ambientes los suelos desarrollados en áreas convexas son erosionados (reducción del espesor del suelo) y las partículas del suelo son transportadas y depositadas en áreas cóncavas (incremento del espesor del suelo). Los resultados obtenidos muestran que el espesor del suelo varía ligeramente entre las posiciones topográficas, pero no son significativas, siendo las áreas convexas donde se encuentran los suelos más profundos. Estos hallazgos concuerdan con los estudios realizados por Molina et al. (2019) en el cual se demostró que las variaciones en el espesor del suelo no son significativas entre las posiciones topográficas. La aparente variación mínima en la profundidad del suelo puede ser explicada por diferentes factores: i) la erosión hídrica es limitada o inexistente en las laderas con una cubierta vegetal bien densa (Poulenard et al., 2001); ii) la bioturbación y reptaciones son los principales procesos de movilización vertical de partículas del suelo (Molina et al., 2019); y iii) la redistribución de las partículas del suelo a lo largo de la pendiente experimentan un transporte lento conducidas por el flujo subsuperficial que predomina en el paisaje.

Mientras el efecto de la topografía es mínimo sobre la variación del espesor del suelo, el efecto de la vegetación es muy significativo, particularmente entre almohadilla y bosque como también entre almohadilla y pajonal ($p < 0.005$) (Tabla 4). Los mayores espesores del suelo se observaron bajo coberturas de almohadilla que comúnmente se localizan en sitios anegados la mayor parte del año. Las diferencias más grandes en espesor ocurren entre suelos cubiertos por almohadilla y pajonal, en cambio en suelos cubiertos por pajonal y bosque la diferencia es insignificante, en promedio (Ilustración 10, Tabla 2). Similares resultados fueron encontrados por Molina et al. (2019) cuyo estudio demostró que las variaciones en el desarrollo del suelo dependen fuertemente de la vegetación y la intensidad de la meteorización química. Sin embargo, los suelos con menor espesor se observaron bajo la vegetación de almohadilla lo cual es opuesto a lo obtenido en este estudio. La aparente discrepancia en los resultados podría deberse a la escala del

muestreo, mientras que en esta investigación se seleccionaron sitios basados en la topografía (modelo de elevación) y el tipo de cobertura vegetal distribuidos espacialmente a toda la microcuenca Cuevas, en cambio Molina et al. (2019) utilizó toposecuencias de suelo (catenas) en las laderas con diferentes tipos de vegetación. Esta diferencia de enfoques para el muestreo de los suelos resultó que en esta investigación se llegó a muestrear el fondo del valle y áreas planas en la parte media y alta de la cuenca. Estos sitios son generalmente donde los flujos de agua de las laderas convergen (flujo subsuperficial y superficial) y se caracterizan por la vegetación de almohadillas, por lo tanto, con un sistema hidrológico distinto al que ocurre en las laderas.

Analizando estos hallazgos se puede inferir que en la cuenca funcionan dos sistemas hidrológicos distintos pero que están interconectados y que sus procesos están controlados parcialmente por la vegetación que a su vez afecta el desarrollo del suelo, El grado de desarrollo del suelo depende fuertemente de la intensidad de la meteorización química, la cual está mediada por el tipo de vegetación que controla en gran medida la hidrología del suelo. Por eso suelos formados bajo bosque y pajonal son bien drenados y sus sistemas radiculares son profundos, estas características de las plantas ocasionan que se conviertan en agentes de la meteorización porque proporcionan sustancias ácidas al suelo, de esta manera los suelos se convierten en acídicos con un grado intenso de la meteorización química y mayor desarrollo del suelo que se refleja con espesores más grandes (Molina et al., 2019). Por otro lado, los suelos formados bajo una vegetación de almohadillas son superficiales debido parcialmente a que se desarrollan en condiciones anegadas (suelos anaeróbicos) con poco oxígeno disponible para las plantas que da como resultado un crecimiento radicular limitado ejerciendo un efecto débil como agente de la meteorización como consecuencia los suelos son menos desarrollados.

Finalmente, se puede interpretar que los suelos formados en los fondos del valle y zonas de convergencia de flujos de agua se comportan diferente a los suelos de las laderas y su transición con el valle. Mientras los suelos de las pendientes se desarrollan in-situ o son el resultado de un transporte lento de partículas del suelo, los suelos en las partes bajas de las pendientes son el producto de la acumulación del suelo erosionado de las laderas y de la meteorización química, cuyos procesos ocurren a una escala milenaria.

4.4. Almacenamiento del carbono como una función del espesor del suelo

Varias investigaciones sobre la estimación del almacenamiento de carbono en ecosistemas de páramo han utilizado diferentes enfoques que varían desde muestreo de suelos en horizontes superficiales (<0.30 m) (Minaya et al., 2016), muestreo de núcleos de suelo en humedales (Hribljan et al., 2016) y perfiles de suelo (Tonneijck et al., 2010). Estos dos últimos estudios han resaltado la importancia de incorporar el espesor del suelo para obtener estimaciones precisas de TCS, pero su distribución espacial es limitada y por lo tanto sus resultados no capturan el efecto de la heterogeneidad del espesor del suelo debido a variaciones en la topografía y vegetación. Si bien el almacenamiento del carbono en las capas superficiales de los suelos ha sido bien cuantificado en diferentes investigaciones y ecosistemas; la contribución de carbono orgánico localizados en horizontes de suelo más profundos (> 0.30 m) podría ser muy significativa pudiendo inclusive llegar hasta la mitad del carbono total almacenado (Rumpel et al., 2002).

De los resultados obtenidos sobre el espesor del horizonte A, se encontraron valores medios bastante similares entre las diferentes coberturas vegetales y posiciones topográficas (~0.30 m) que variaron desde 0.03 hasta 0.94 m. Las zonas convexas presentan los espesores mayores del horizonte A con un valor medio de 0.35 ± 0.17 m, mientras que las zonas cóncavas presentan los espesores más delgados con un valor medio de 0.28 ± 0.13 m (Tabla 2). Esto contradice, de cierta manera, a lo expuesto por Llambí et al. (2012) que explica que entre menor sea la pendiente mayor es la profundidad del suelo, siendo las zonas planas y las depresiones donde existen suelos más profundos; a pesar de esto se constató que las zonas que presentan pendientes muy pronunciadas (principalmente en la parte superior de la microcuenca) el espesor del suelo era significativamente inferior reflejando un menor desarrollo del mismo. Con respecto al tipo de vegetación, se observaron espesores del horizonte A muy similares entre las diferentes vegetaciones con un valor medio de aproximadamente de 0.31 m (Tabla 2).

Mientras que los horizontes que presentaron menor espesor corresponden a aquellos de transición entre el horizonte A y el horizonte parental. Los suelos que presentan un mayor espesor del horizonte AC están cubiertos por pajonal (PAJ) con un valor promedio de 0.18 ± 0.10 m, mientras que las zonas con cobertura boscosa son las que tienen un espesor de este horizonte más reducido con un valor promedio de 0.14 ± 0.07 m. Sin embargo, el espesor del horizonte AC en las diferentes configuraciones topográficas fue similar (~



0.16 m), siendo las zonas rectas las que presentan un mayor espesor de este horizonte con un valor promedio de 0.17 ± 0.11 m. Finalmente, se observó que el escenario es distinto al analizar el horizonte CA, en el cual el valor promedio del espesor de éste es de 0.12 ± 0.06 m, existiendo diferencias en el espesor en las diferentes posiciones topográficas, pues las zonas rectas presenta un valor promedio de 0.15 ± 0.07 m, siendo las de mayor espesor, mientras que las de menor espesor correspondan a zonas convexas (0.08 ± 0.03). Por otro lado, el espesor del horizonte CA presentó valores medios bastante similares con respecto a las diferentes coberturas vegetales (~ 0.13 m), siendo las zonas de pajonal (0.13 ± 0.06 m) y de bosque (0.13 ± 0.05 m) las que presentan espesores superiores al suelo de cobertura de almohadilla (0.11 ± 0.06 m).

La Ilustración 13 indica que las medianas entre los grupos de cobertura vegetal y topografía son similares. Por lo tanto, las diferencias no fueron significativas.

Se observaron porcentajes altos de carbono orgánico en los diferentes horizontes (entre 11% a 18% en los horizontes A de mayor espesor) lo que refleja la presencia de altos contenidos de materia orgánica, mientras que los horizontes de menor espesor y más profundos (horizontes de transición AC y CA) presentan un valor medio de entre 3% y 5% de carbono orgánico.

Existe una relación inversa entre el contenido de carbono y la profundidad del suelo, es decir, a mayor profundidad la concentración de C disminuye, por lo que horizontes de transición tales como AC y CA presentan valores inferiores a los medidos en horizontes más superficiales. Sin embargo, su aporte sigue resultando importante en el secuestro total de carbono, principalmente en suelos cubiertos por almohadillas y bosques con una media de $6.89 \pm 3.91\%$ y $6.41 \pm 2.33\%$, respectivamente, de carbono orgánico en el horizonte AC. Mientras que, la variación según la posición topográfica fue menos evidente para este horizonte, resaltando las zonas rectas con un valor medio de $6.89 \pm 3.59\%$. En promedio, el horizonte AC tiene $5.62 \pm 2.83\%$ de contenido de carbono. El horizonte CA registró un valor similar en las diferentes configuraciones topográficas y coberturas vegetales, sin variaciones significativas entre estas clases, destacándose el suelo de cobertura boscosa que presentó una media de $4.37 \pm 1.51\%$ de carbono. De manera general, este horizonte tiene un contenido promedio de carbono orgánico de $3.42 \pm 1.44\%$. Hribljan et al. (2016) analizó el contenido de carbono en suelos de páramo en el noreste del país, revelando una variación entre 3.1 y 8.3% con una media de 6.0% en suelos

minerales localizados entre horizontes de turbas. Valor que se encuentra por encima de la media registrada en la microcuenca Cuevas en suelos con un alto contenido de material mineral (horizonte CA= $3.42 \pm 1.44\%$). Esta diferencia podría interpretarse debido a que en las mediciones realizadas por Hribljan et al. (2016) el suelo mineral se encuentra enterrado entre capas orgánicas pudiendo el carbono enriquecerse durante el tiempo de formación del suelo y no representan los horizontes de transición como son el AC o CA en los suelos del sur.

En el área de estudio las estimaciones de carbono total en el suelo (TCS) varió entre 10.49 y 126.83 kg/m^2 , con un valor promedio de $34.25 \pm 18.75 \text{ kg/m}^2$ (Tabla 2). No obstante, el valor calculado es menor al obtenido por Tonnejck et al. (2010) quién analizó suelo forestal y de páramo a un metro de profundidad en la Estación Biológica Guandera con un promedio de TCS de $53 \pm 0 \text{ kg/m}^2$. Sin embargo, en los 30 cm de profundidad se registra mayor contenido de carbono en el suelo de la microcuenca Cuevas con un promedio de 30.98 kg/m^2 mientras que el promedio a esta profundidad en Guandera fue de 22 kg/m^2 . Este hallazgo refleja que los suelos del sur del Ecuador están altamente meteorizados lo cual conduce a que los suelos sean ácidos ($\text{pH} < 5$) y que el carbono orgánico esté fuertemente enlazado con el Al y Fe formando complejos orgánico-metálicos, esta característica hace que el carbono sea estabilizado y por lo tanto retenido (Molina et al., 2019).

A pesar que los suelos más profundos se presentan en posiciones topográficas convexas, se observó un mayor almacenamiento de carbono en pendientes rectas con una media de $36.53 \pm 17.09 \text{ kg/m}^2$, un valor cercano al obtenido en posiciones cóncavas ($31.06 \pm 16.51 \text{ kg/m}^2$) y convexas ($35.16 \pm 22.4 \text{ kg/m}^2$) indicando que la posición topográfica no incide de manera significativa sobre el TCS ($p > 0.05$) (Tabla 5). Un estudio reciente realizado por Minaya et al. (2016) a lo largo del flanco sur-oeste del volcán Antisana (norte del Ecuador) a similar altitud, se encontró un valor promedio de almacenamiento total de carbono en el suelo a 0.30 m de profundidad con un valor promedio de 17.43 kg/m^2 , mientras que el valor promedio estimado en Cuevas para la misma profundidad es 21.34 kg/m^2 . Estos resultados sugieren que el almacenamiento de carbono varía con el grado de desarrollo del suelo, mientras en el norte y centro del país los horizontes superficiales se desarrollan sobre depósitos de ceniza recientemente depositada y por lo tanto se rejuvenecen lo que lleva a la formación de alófanos en general, en cambio en el sur del

país los suelos están más evolucionados lo que da lugar a la formación de complejos orgánicos-metálicos los cuales ejercen una mayor resistencia a la degradación y por lo tanto retienen la MO. Un aspecto importante de estos hallazgos es la importancia del carbono orgánico en los suelos los cuales regulan diferentes servicios ecosistémicos como la biogeoquímica, por lo tanto, las diferencias que existen en los suelos orgánicos entre el sur y norte del país se podrían traducir en diferencias en la química de los suelos.

Analizando el efecto de la vegetación en el TCS, las zonas de mayor almacenamiento de carbono corresponden a suelos cubiertos por bosque con una media de 41.04 ± 19.32 kg/m², seguida por suelos cubiertos de almohadilla con una media de 34.27 ± 23.31 kg/m² y finalmente por suelos cubiertos de pajonal con 27.43 ± 7.66 kg/m² (Tabla 2). Estas diferencias en TCS entre los tipos de vegetación son significativas ($p < 0.0027$).

En el estudio de Minaya et al. (2016) se observó que los suelos con cobertura de almohadilla y pajonal variaron entre 17.38 y 18.18 kg/m², en promedio respectivamente, mientras que en Cuevas se encontraron mayores contenido de carbono para las mismas coberturas vegetales a similar profundidad, con un valor promedio de 20.37 kg/m² en suelos cubiertos por almohadillas y 18.53 kg/m² en suelos con cobertura de pajonal, valor bastante cercano al obtenido por Minaya et al. (2016) e inferior al obtenido por Tonneijck et al. (2010) en suelos cubiertos de pajonal con un promedio de 21.75 kg/m². De estas comparaciones podríamos interpretar que las reservas de carbono entre el norte y sur del país no presentan grandes diferencias y se encuentra en el mismo orden de magnitud para las capas superficiales, pero esta aparente similitud podría variar significativamente si se compara con la profundidad (> 100 cm) ya que los suelos del norte se caracterizan por estar formados por capas enterradas de depósitos de ceniza con un alto contenido de carbono. Esta característica contrasta con el sur del país debido a que la capa orgánica del suelo es relativamente delgada con un espesor promedio de 50 cm (Molina et al., 2019) y se desarrollan sobre rocas volcánicas, por lo tanto las capas debajo de los horizontes orgánicos presentan concentraciones bajas de carbono. A pesar que los suelos del norte y sur comparten relativamente en el material parental sobre el cual se desarrollan, por eso la química de los suelos está condicionada por la composición química de la ceniza o roca volcánica.

Finalmente, estos resultados indican que la mayor cantidad de TCS en suelos forestales es el resultado del mayor reciclaje de la vegetación arbórea y desechos radiculares. Al

existir grandes capas de hojarascas acumuladas en el suelo y un aporte significativo de raíces y microorganismos muertos, la descomposición vegetal es lenta debido al clima húmedo y frío con valores superiores a 10 de la relación C/N que es un indicador del grado de descomposición y mineralización. Otro elemento importante es la profundidad de las raíces, las cuales son profundas en los suelos de bosque y pajonal en comparación con la vegetación de almohadillas. Las raíces no solamente aportan materia orgánica por la descomposición de material de raíces muertas, sino también porque el sistema radicular crea un sistema de orificios a través del suelo por donde circulan los flujos de agua en los cuales es transportado el carbón orgánico disuelto. Finalmente, los procesos de bioturbación en los suelos de páramo son importantes para mezclar verticalmente la materia orgánica desde las capas superiores hacia capas subterráneas (Tonneijck et al., 2010).

Tabla 6: Resultados de la prueba paramétrica ANOVA de una vía para tipo de vegetación y posición topográfica, comparación entre grupos mediante prueba post-hoc Tukey HSD

Variables	Efecto topografía	Comparación posthoc (p<0.05)			Efecto vegetación	Comparación posthoc (p<0.05)		
	p value	CC vs CX	CC vs RC	CX vs RC	p value	ALM vs BOS	ALM vs PAJ	BOS vs PAJ
%C horizonte A	0.971	-	-	-	0.0010	No	Sí	Sí

Nota: CC= cóncavo; CX= convexo; RC= recto; ALM= almohadilla; BOS= bosque; PAJ= pajonal; %C horizonte A = porcentaje de carbono orgánico en el horizonte A

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los resultados de esta investigación revelaron que en la microcuenca Cuevas existe una fuerte influencia de la cobertura vegetal sobre la profundidad del suelo (espesor del suelo), superior al efecto ejercido por la topografía. Esto se refleja principalmente en la cobertura de almohadilla, particularmente en áreas de fondo del valle o sitios planos en las laderas, las mismas que presentan valores superiores de profundidad respecto a las coberturas forestales y pajonal. El espesor del suelo en la microcuenca exhibe un valor medio de 0.55 ± 0.22 m, el cual corresponde mayoritariamente al horizonte A, el mismo que representa cerca del 58% del espesor total del suelo en los sitios analizados. Además, la densidad aparente baja en los horizontes A responde a la alta porosidad como resultado de la alta meteorización del material volcánico y la actividad biológica, estos procesos asociados al clima frío llevan a una lenta descomposición de la materia orgánica, misma que se acumula durante el desarrollo del suelo.

Los suelos de páramo presentan características asombrosas relacionadas al almacenamiento de carbono orgánico. Este estudio encontró que los suelos analizados presentaron valores de densidad aparente bajos en los primeros horizontes: el horizonte O un valor medio de 0.38 ± 0.18 g/cm³, mientras que el A de 0.60 ± 0.19 g/cm³; y en los horizontes de transición el valor era superior a 1.05 ± 0.52 g/cm³. Sin embargo, el contenido de carbono fue mayor en los horizontes superiores del suelo (18%) mientras que en los horizontes inferiores (respecto a la superficie) el contenido de carbono orgánico disminuyó (5%), demostrando la relación inversa existente entre el porcentaje de carbono y la densidad aparente. Una vez obtenidos estos parámetros se calculó el almacenamiento de carbono total en el suelo siendo su valor medio de 34.25 kg/m² resaltando la importancia de estos ecosistemas para mitigar y combatir el calentamiento global. Las zonas que presentan mayor acumulación de carbono en el suelo corresponden a coberturas forestales con una media de 41.04 kg/m², zona que abarca una superficie menor al 2% del área total de la microcuenca. Sin embargo, la zona de mayor extensión es la de pajonal, la cual abarca el 81.2% del área total y un valor medio de almacenamiento de carbono en el suelo de 27.43 kg/m². A pesar que la vegetación de almohadillas representa aproximadamente el 16% del área total de la microcuenca Cuevas, su capacidad de retención de carbono podría ser desproporcional en comparación con el pajonal con un



valor medio de 34.27 kg/m². Esta capacidad de almacenamiento de TCS presentado por las tres coberturas vegetales muestra su importancia significativa relacionado con la mejora en la resiliencia al cambio climático.

Se constató un mayor contenido de carbono orgánico en los horizontes más desarrollados, es decir, en aquellos en los que la intervención del medio físico, químico y biológico tiene mayor influencia debido a su exposición, siendo estos los horizontes O (orgánico) y A, los cuales indicaron valores de contenido de carbono altos con respecto a los horizontes inferiores, pues sus valores medios son 18.55% y 11.99% respectivamente, lo que indica que existe mayor fijación de este elemento en suelos más desarrollados, los mismos que capturan mediante la descomposición vegetal y lo integran al suelo. Finalmente, aquellos horizontes que presentan en su matriz fragmentos de material menos consolidado, poco alterados y fragmentos rocosos (suelos menos desarrollados: horizonte AC y CA) se caracterizaron por presentar valores inferiormente significativos a los primeros horizontes, pues sus valores medios fueron 5.62% y 3.42% respectivamente. A pesar de la diferencia en TCS entre los horizontes superficiales y los más profundos, este estudio ha resaltado la importancia del almacenamiento de carbono en el subsuelo como una fuente importante de carbono. Los resultados de esta tesis resaltan la importancia del carbono almacenado en el suelo y la susceptibilidad de este recurso a alteraciones ocasionadas por el cambio global, particularmente en regiones caracterizadas por espesores delgados de suelos, los cuales podrían sufrir cambios más acelerados en las reservas de carbono comparadas a regiones con suelos de espesores más profundos. De esta forma, los resultados proporcionados en este estudio consolidan una base importante para la toma de decisiones en el manejo íntegro del páramo, con propuestas encaminadas a su conservación y protección, siendo ecosistemas altamente significativos por los servicios ecosistémicos que brindan, entre ellos el almacenamiento de carbono en el suelo analizado en la presente investigación.

5.2. Recomendaciones

Debido a la utilización de herramientas informáticas en la determinación de los sitios de muestreo, se recomienda la verificación en campo, de forma que los sitios seleccionados correspondan a la topografía y vegetación que se busca analizar; caso contrario se



requerirá de situar nuevamente el punto de muestreo para el correcto cumplimiento de los objetivos planteados.

Se recomienda el estudio continuo y detallado de esta temática en los diferentes ecosistemas de páramo, mismos que proporcionan servicios ecosistémicos, que incluso van más allá del entendimiento humano y de esta forma brinden soporte a programas de conservación de estos ecosistemas altamente vulnerables a alteraciones antrópicas. Además de un monitoreo constante para reportar un historial de las variaciones temporales del carbono almacenado en el suelo, así como posibles cambios significativos de vegetación o de usos del suelo que puedan provocar la pérdida de carbono orgánico almacenado.

Actualmente, a pesar de la restricción de uso de suelo para ganadería por parte de ETAPA EP, es posible constatar que esta disposición no se cumple totalmente, lo que podría provocar cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, conllevando a cambios en el almacenamiento de carbono en el suelo. De esta forma se recomienda evaluar el posible efecto a largo plazo en función del cumplimiento o incumplimiento de las medidas de protección ejecutadas por ETAPA EP, siendo posible emplear los datos proporcionados en esta investigación como línea base de la condición actual del suelo en la zona.

Además, se espera que los resultados obtenidos en esta investigación encaminen a estudios futuros de almacenamiento de carbono con fines de modelización para comprender mejor los procesos del ciclo de carbono en los ecosistemas de páramo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi, H. (2010). Holm's sequential Bonferroni procedure. *Encyclopedia of research design*, 1(8), 1–8.
- Alfaro, J. M., Limón, B., & Martínez, G. Á. (2014). *Ambiente y Sustentabilidad: Por una educación ambiental*. Grupo Editorial Patria.
- Amat, R. (2016a). ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. RPubS. https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148
- Amat, R. (2016b). ANOVA con R. RPubS. https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148
- Amay, E. (2018). *Modelación del flujo de agua y nitrato en el suelo de la microcuenca Cuevas en el sur de los Andes ecuatorianos empleando Hydrus 1D*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31129>
- Asanza, J. C., & Barahona, J. A. (2015). *Impacto de la cobertura vegetal y las actividades antrópicas sobre la formación del suelo en una microcuenca de páramo en la cuenca del Río Yanuncay-Quebrada Cuevas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21930>
- Ballester, F., Díaz, J., & Manuel Moreno, J. (2006). Cambio climático y salud pública: Escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. *Gaceta Sanitaria*, 20, 160–174. <https://doi.org/10.1157/13086040>
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotten, J., Silva, J., Bourdon, E., & Eissen, J.-P. (2001). Mio–Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: The Quimsacocha volcanic center. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(4), 561–570.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Cárdenas, A., & Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA*.
- Borja, De Bièvre, & Cisneros, P. (2008). *Desarrollo de funciones de Edafo-Transferencia para la caracterización hidráulica de Andosoles*. Maestría. Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador.
- Borja, Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). *Características físico-químicas de Histosoles y Andosoles de los páramos de Quimsacocha, Ecuador*.
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>



- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53–72.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. D. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10), 2–12.
- Cabin, R., & Mitchell, R. (2000). To Bonferroni or Not to Bonferroni: When and How Are the Questions. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 81, 246–248.
<https://doi.org/10.2307/20168454>
- Castañeda, H. J. A., Alvarado, J., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) En el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21–31.
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
- Cavieres, L., Arroyo, M. T. K., Peñaloza, A., Molina-Montenegro, M., & Torres, C. (2002). Nurse effect of *Bolax gummifera* cushion plants in the alpine vegetation of the Chilean Patagonian Andes. *Journal of Vegetation Science*, 13(4), 547–554. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02081.x>
- Chadwick, Gavenda, R., Kelly, E., Ziegler, K., Olson, C., Crawford, E., & Hendricks, D. (2003). The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chemical Geology*, 202(3), 195–223.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.09.001>
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R. M., Peregón, A. M., Rayner, P. J., Miller, C. E., Gobron, N., Kinderman, G., & Marland, G. (2013). Current systematic carbon cycle observations and needs for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences Discussions*, 10, 11447–11581.
- CIIFEN. (2019). *Efecto Invernadero*. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es
- Cisneros, P., Cajamarca, J., & Pacheco, E. (2010). *Estudios para establecer la línea base de suelos inalterados en el páramo de Quimsacocha*. 9.



- Cunalata, C., Inga, C., Recalde, C., & Echeverría, M. (2013). Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades del chimborazo y shobol llinllin en Ecuador. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 27, 10–13.
- Dávalos, R., Rodríguez, M., & Martínez, E. (2008). Almacenamiento de carbono. *Instituto Nacional de Ecología. MX*.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165–173.
- Dick, D. P., Nunes Gonçalves, C., Dalmolin, R., Knicker, H., Klamt, E., Kögel-Knabner, I., Simões, M. L., & Martin-Neto, L. (2005). Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. *Geoderma*, 124(3), 319–333.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>
- Dinno, A. (2015). Nonparametric Pairwise Multiple Comparisons in Independent Groups using Dunn's Test. *The Stata Journal*, 15(1), 292–300.
<https://doi.org/10.1177/1536867X1501500117>
- Doetterl, S., Berhe, A. A., Arnold, C., Bodé, S., Fiener, P., Finke, P., Fuchslueger, L., Griepentrog, M., Harden, J. W., & Nadeu, E. (2018). Links among warming, carbon and microbial dynamics mediated by soil mineral weathering. *Nature Geoscience*, 11(8), 589–593.
- Drever, J. I. (2005). *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils: Treatise on Geochemistry* (Vol. 5). Elsevier.
- FAO. (2002). *La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/Y2779S/y2779s06.htm>
- FAO. (2019). *State of food and agriculture 2019 (Spanish Edition): Moving forward on food loss and waste... reduction*. Food & Agriculture ORG.
<http://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29.
- Gamarra, C. C., Díaz, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. del P., Cabrera Cardús, A. J. N., Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. del P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4–26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>



- Garamszegi, L. Z. (2006). Comparing effect sizes across variables: Generalization without the need for Bonferroni correction. *Behavioral Ecology*, 17(4), 682–687. <https://doi.org/10.1093/beheco/ark005>
- García, J., Casals, P., Camarero, L., Huguet, C., Sebastià, M.-T., Thompson, R., & Romanyà, J. (2007). Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: Effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82(3), 279–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9071-9>
- Gobierno Provincial del Azuay. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Azuay. Actualizado 2015-2030*. Cuenca: Gobierno Provincial del Azuay.
- Gómez, M., Danglot, C., & Vega, L. (2003). Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuándo usarlas. *Revista Mexicana de Pediatría*, 70(2), 91–99.
- Guncay, J. (2015). *Caracterización hidrofísica del material parental a escala de parcela en una zona de páramo, caso de estudio*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21689>
- Hansen, Rodbell, D., Seltzer, G. O., León, B., Young, K. R., & Abbott, M. (2003). Late-glacial and Holocene vegetational history from two sites in the western Cordillera of southwestern Ecuador. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1), 79–108. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00272-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00272-4)
- Harrison, P. A., Berry, P. M., & Dawson, T. P. (2003). Modelling natural resource responses to climate change (the MONARCH project): An introduction. *Journal for Nature Conservation*, 11(1), 3–4.
- Hernández, J., Tirado, D., & Beltrán, I. (s/f). *Captura de carbono en los suelos*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado el 3 de marzo de 2020, de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e4.html>
- Hofstede. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111–132. <https://doi.org/10.1007/BF00155524>
- Hofstede. (1997). La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo. *EcoPar*, Agosto.
- Honorio, E., & Baker, T. R. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. *Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana*. <http://repositorio.iiap.gob.pe/handle/IIAP/290>
- Hribljan, J. A., Suárez, E., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2016). Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 113–127. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>



- Ibáñez, & Manríquez. (2011). *Los Andosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos / Un Universo invisible bajo nuestros pies*.
<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>
- Ibáñez, Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad politécnica de Valencia*.
- Iversen, P., Lee, D., & Rocha, M. (2014). *Understanding land use in the UNFCCC*.
- Kramer, M. G., & Chadwick, O. A. (2016). Controls on carbon storage and weathering in volcanic soils across a high-elevation climate gradient on Mauna Kea, Hawaii. *Ecology*, 97(9), 2384–2395.
- Lemus, R., & Lal, R. (2005). *Bioenergy Crops and Carbon Sequestration: Critical Reviews in Plant Sciences: Vol 24, No 1. 24(1)*.
<https://doi.org/doi/10.1080/07352680590910393>
- Llambí, L. D., Soto-W., A., Célleri, R., Bièvre, B. de, & Borja, P. (Eds.). (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino*. Proyecto Páramo Andino.
- Llanos, E. P., & Escandón, J. C. (2016). *Almacenamiento de carbono en el suelo bajo tres tipos de cobertura vegetal en los páramos andinos en la Cuenca del Río Paute*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25597>
- Llorente, M. (2012). *Aportaciones al conocimiento de la dinámica de la materia orgánica edáfica en suelos calizos del páramo Castellano-Leonés*.
<https://doi.org/10.35376/10324/1718>
- Lok, S., Fraga, S., Noda, A., & García, M. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(1), 75–82.
- Madrigal, S., Cristóbal, D., Hernández, E., & Romo, J. L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201–223.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68–96.
<https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- McKnight, P. E., & Najab, J. (2010). Kruskal-Wallis Test. En *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (pp. 1–1). American Cancer Society.
<https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Mena, P. A., Medina, G., & Josse, C. (2000). *Los suelos del páramo*. Abya Yala.



- Minaya, V., Corzo, G., Romero-Saltos, H., van der Kwast, J., Lantinga, E., Galárraga-Sánchez, R., & Mynett, A. (2016). Altitudinal analysis of carbon stocks in the Antisana páramo, Ecuadorian Andes. *Journal of Plant Ecology*, 9(5), 553–563. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv073>
- Mizota, C., & Reeuwijk, L. P. van. (1989). Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Clay Mineralogy and Chemistry of Soils Formed in Volcanic Material in Diverse Climatic Regions.*, No. 2. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19901941362>
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., & Balthazar, V. (2015). Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4201–4213.
- Molina, A., Vanacker, V., Corre, M. D., & Veldkamp, E. (2019). Patterns in Soil Chemical Weathering Related to Topographic Gradients and Vegetation Structure in a High Andean Tropical Ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(2), 666–685. <https://doi.org/10.1029/2018JF004856>
- Molina, A., Veldkamp, E., Corre, M., & Vanacker, V. (2018). Chemical weathering in high Andean ecosystems: Interaction of vegetation and topography. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 20, 7259.
- Monroe, R. (2019). *Carbon Dioxide Levels Hit Record Peak in May*. Scripps Institution of Oceanography. <https://sioweb.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2019/06/04/carbon-dioxide-levels-hit-record-peak-in-may/>
- Mora, D. E., & Willems, P. (2012). Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin—Southern Andes of Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1–2), 267–282.
- Ogle, D., Wheeler, P., & Dinno, A. (2020). *Simple Fisheries Stock Assessment Methods*. FSA. <https://derekogle.com/FSA/>
- Ontl, T. A., & Schulte, L. A. (2012). Soil carbon storage. *Nature Education Knowledge*, 3(10).
- Osnaya, P., Fernández, A., & Martínez, J. (2004). *Cambio climático: Una visión desde México*. <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/129>
- Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2007). *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer Science & Business Media.
- Parada, L. (2019). *Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk*. RPubs. <https://www.rpubs.com/F3rnando/507482>



- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V., & Ojima, D. S. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands 1. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1173–1179.
- Patton, N. R., Lohse, K. A., Godsey, S. E., Crosby, B. T., & Seyfried, M. S. (2018). Predicting soil thickness on soil mantled hillslopes. *Nature communications*, 9(1), 1–10.
- Pérez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 157–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Podwojewski, P., & Poulénard, J. (2000). *Los suelos de los páramos del Ecuador*.
- Poulénard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3–4), 267–281.
- Poulénard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.-L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *CATENA*, 45(3), 185–207. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2019). *Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019* (Núm. 10; p. 16).
- Ramírez, M. T., & Cisneros, P. J. (2015). *Determinación de anomalías causadas a las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas, en los suelos de páramo en el sur del Ecuador, ocasionadas por alteraciones antrópicas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23356>
- Roa, M. C., & Brown, S. (2016). Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del Río Barbas (Quindío, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 117–135. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57833>
- Rodríguez, R. A., Arbelo, C. D., Notario, J. S., Mora, J. L., Guerra, J. A., & Armas, C. M. (2004). Contenidos y formas de carbono orgánico en andosoles forestales: Aproximación a su dinámica. *Edafología. Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, SECS*, 11(1), 67–102.
- Rumpel, C., Kögel-Knabner, I., & Bruhn, F. (2002). Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. *Organic Geochemistry*, 33(10), 1131–1142. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00088-8)



- Solórzano, P. (2020). La relación C/N de los suelos y su importancia en la agricultura. *Mundo Agropecuario*. <https://mundoagropecuario.com/la-relacion-c-n-de-los-suelos-y-su-importancia-en-la-agricultura/>
- Spaargaren, O. C. (1999). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. International Soil Science Society (ISSS), International Soil Reference and
- Suárez, E., & Medina, G. (2001). Vegetation Structure and Soil Properties in Ecuadorian Páramo Grasslands with Different Histories of Burning and Grazing. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33(2), 158–164. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1552216>
- Thompson, J. A., & Kolka, R. K. (2005). Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil-landscape modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1086–1093.
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392–405.
- Van Ypersele de Strihou, R. (2019). *Impact du pâturage sur le carbone organique dans les sols du páramo andin Étude de cas à l'Antisana, en Équateur*. Universidad Católica de Lovaina.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3), 299–315. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)
- Vandecasteele, G. (2017). *Topography and vegetation control on chemical weathering in high altitude tropical ash soils*. Universidad Católica de Lovaina.
- Villalpando, J. A. G., Morales, A. C., Guzmán, M. E. R., Sánchez, G. R., & Saavedra, M. U. L. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia*, 35(1), 79–86.
- Wackett, A. A., Yoo, K., Amundson, R., Heimsath, A. M., & Jelinski, N. A. (2018). Climate controls on coupled processes of chemical weathering, bioturbation, and sediment transport across hillslopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(8), 1575–1590.
- Wang, S., Adhikari, K., Wang, Q., Jin, X., & Li, H. (2018). Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C: N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. *Ecological indicators*, 84, 263–272.

7. ANEXOS

Anexo 1. Metodología: generación de puntos de muestreo y categorías de cobertura vegetal y topografía

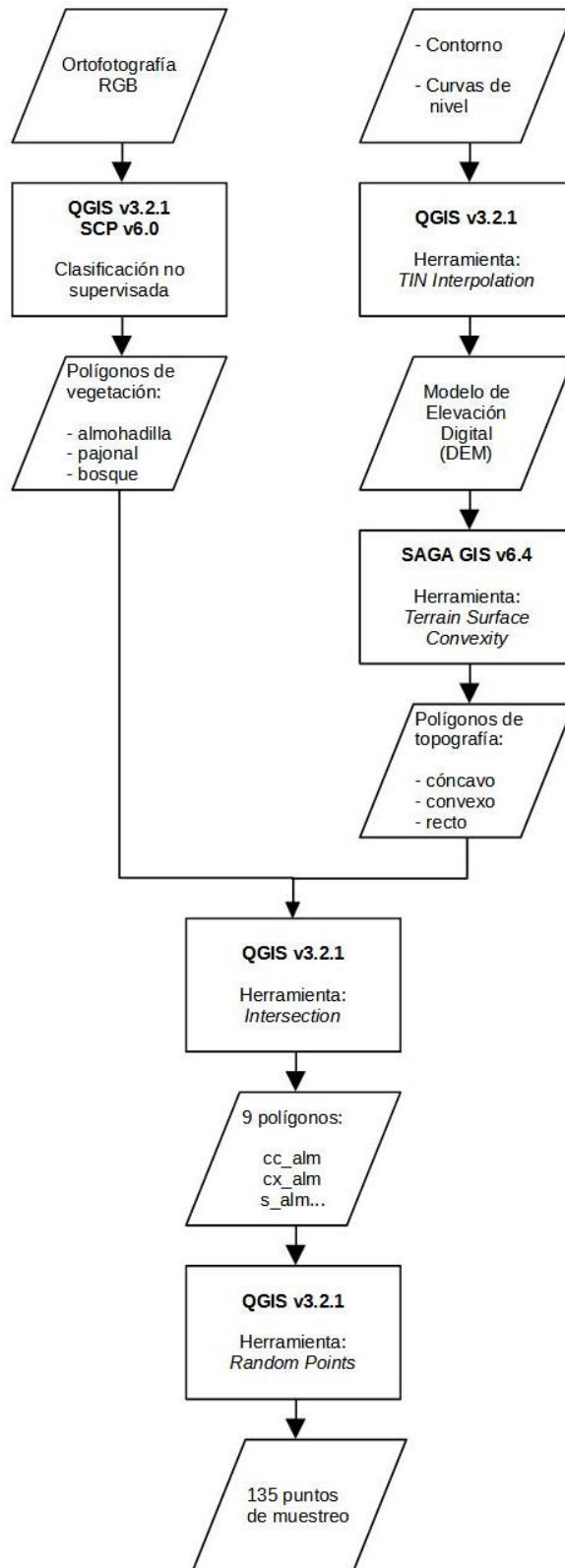


Ilustración 14: Diagrama de flujo para elaboración de mapa de cobertura vegetal y topografía.

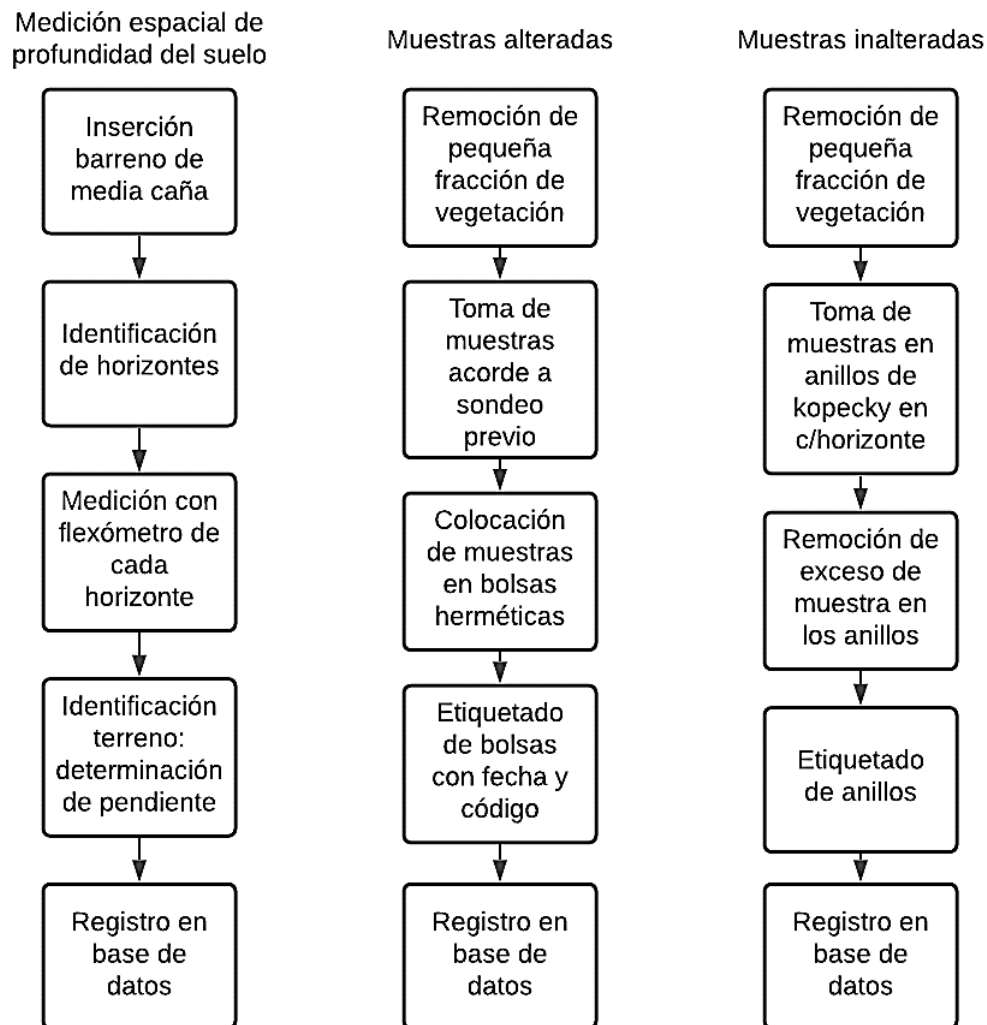
Anexo 2. Metodología: identificación espacial de profundidad y muestreo

Ilustración 15: Procedimiento de medición espacial de la profundidad del suelo y muestreo (muestras alteradas e inalteradas)

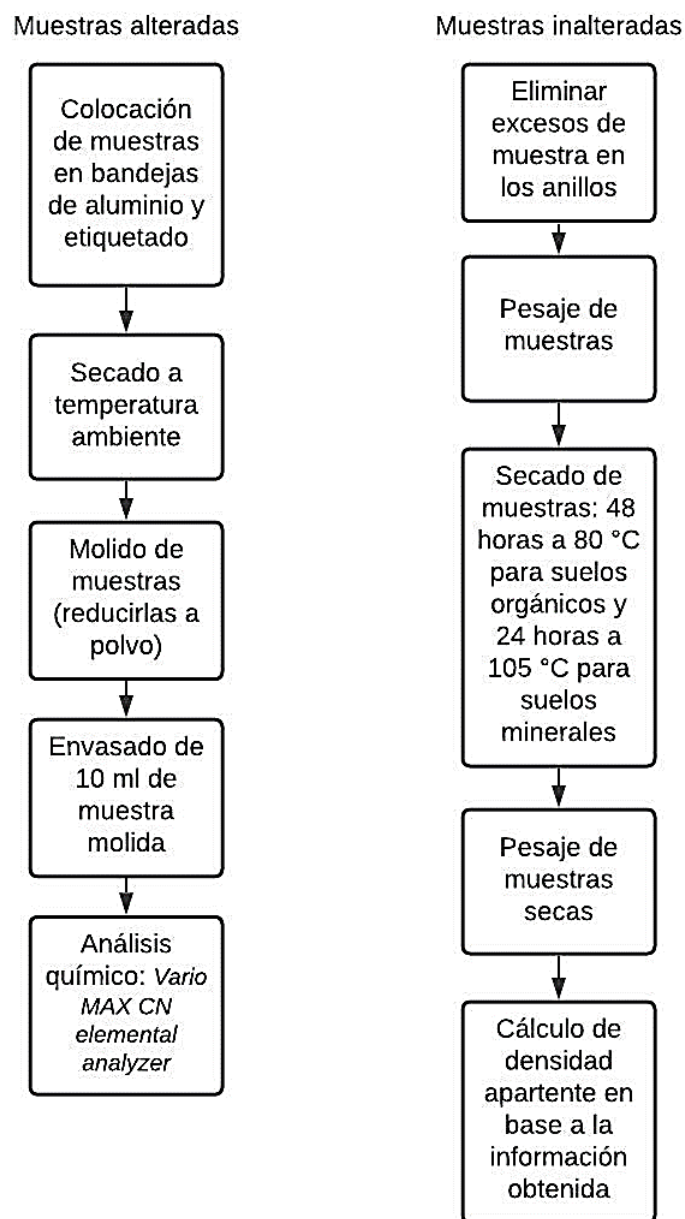
Anexo 3. Metodología: Preparación de muestras y ensayos de laboratorio

Ilustración 16: Procedimiento en la preparación de muestras alteradas e inalteradas y elaboración de ensayos de laboratorio

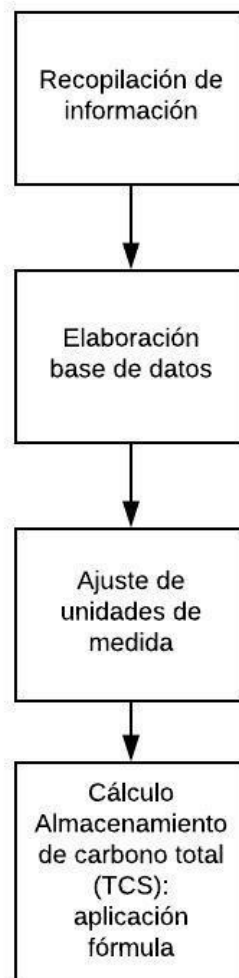
Anexo 4. Metodología: cálculo de almacenamiento de carbono total (TCS)

Ilustración 17: Proceso de adecuación de información para cálculo de almacenamiento de carbono total (TCS)

Anexo 5. Metodología: Análisis estadístico

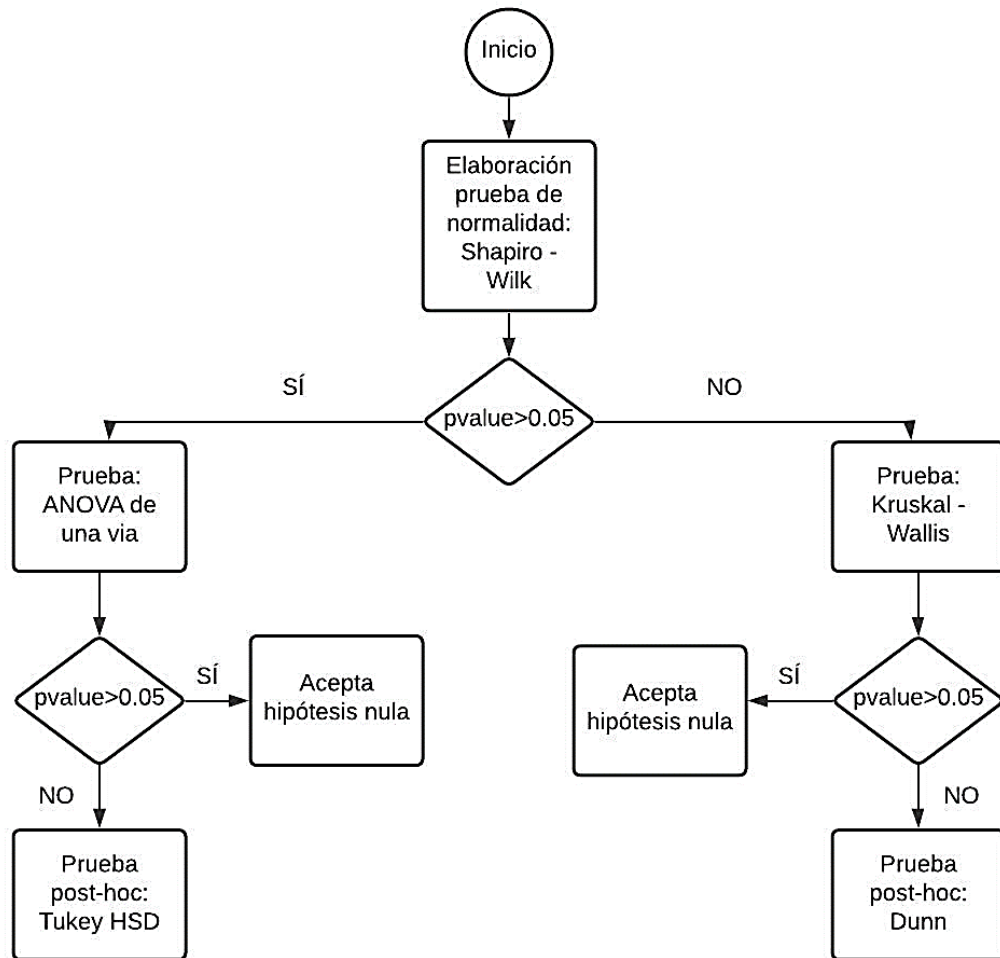


Ilustración 18: Diagrama de flujo para análisis estadístico de resultados de TCS, contenido de carbono y profundidad del suelo