



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Estimación del contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada
Hualcanga, Páramo del Igualata, provincia de Tungurahua**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autor:

Barrigas Cevallos Joselyn Carla
Navas Sauce Angie Michelle

Tutora:

MsC. Carla Fernanda Silva Padilla

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotras, Barrigas Cevallos Joselyn Carla y Navas Sauce Angie Michelle, con cédula de ciudadanía 060511301-8 y 060421968-3, autoras del trabajo de investigación titulado: **Estimación del contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata, Provincia de Tungurahua**, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cessionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 03 días del mes de septiembre de 2024.



Joselyn Carla Barrigas Cevallos

C.I: 060511301-8



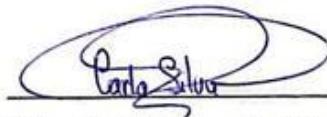
Angie Michelle Navas Sauce

C.I: 060421968-3

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Mgs. Carla Fernanda Silva Padilla catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación Estimación del contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata, provincia de Tungurahua, bajo la autoría de Barrigas Cevallos Joselyn Carla y Navas Sauce Angie Michelle; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 03 días del mes de septiembre de 2024.



Mgs. Carla Fernanda Silva Padilla
C.I: 0603952086

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EDÁFICO EN LA ZONA ALTA DE LA QUEBRADA HUALCANGA, PÁRAMO DEL IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”, presentado por Joselyn Carla Barrigas Cevallos y Angie Michelle Navas Sauce, con cédula de identidad número 060511301-8 y 060421968-3, bajo la tutoría de Mgs. Carla Fernanda Silva Padilla; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 17 de septiembre de 2024.

Dra. Anita Ríos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. José Prato Mgs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Patricio Santillán Mgs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

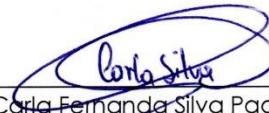




CERTIFICACIÓN

Que, **BARRIGAS CEVALLOS JOSELYN CARLA** con CC: **0605113018**, estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EDÁFICO EN LA ZONA ALTA DE LA QUEBRADA HUALCANGA, PÁRAMO DEL IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**", cumple con el 5%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 3 de septiembre de 2024



Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs
TUTOR(A)



CERTIFICACIÓN

Que, **NAVAS SAUCE ANGIE MICHELLE** con CC: **0604219683**, estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EDÁFICO EN LA ZONA ALTA DE LA QUEBRADA HUALCANGA, PÁRAMO DEL IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**", cumple con el 5%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 03 de septiembre de 2024



Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs
TUTOR(A)

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado en primer lugar:

A Dios por brindarme fortaleza, sabiduría e iluminar mi camino, permitiéndome cumplir y alcanzar todos mis sueños y objetivos.

A mi madre Clemencia Sauce que con su amor, sacrificio y ejemplo me motivó y ofreció su apoyo incondicional siempre para cumplir con esta meta.

A mi padre Oswaldo Navas por brindarme su apoyo y motivación para continuar adelante con mis estudios.

A mis segundos padres mis abuelitos, Ercilia y Miltón que cuidaron y velaron por mi desde bebé, para convertirme en la gran mujer y ahora profesional que soy.

A mis hermanos, por su constante respaldo y aliento. Su apoyo ha sido fundamental para lograr crecer como persona y alcanzar el éxito en mi camino.

Y, por último, pero no menos importante, a cada uno de mis distinguidos docentes, de esta gran y gloriosa Universidad, porque me han compartido sus grandes conocimientos a lo largo de mi vida universitaria, dejando una huella imborrable en mí.

Angie Navas

A Dios por haberme brindado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para enfrentar y superar cada desafío en este viaje académico.

A mis queridos padres, Norma Cevallos y Bolívar Barrigas, a mi hermano Bryan Barrigas, que han sido una fuente inagotable de amor, apoyo y motivación, dedico este logro con profundo y sincero agradecimiento. Su confianza en mí ha sido un pilar fundamental en todo este proceso.

A mis ingenieros y mentores, cuyas valiosas orientaciones, consejos y sabiduría han sido cruciales para el desarrollo y éxito de esta tesis. Sus enseñanzas no solo han enriquecido este trabajo, sino también mi formación profesional y personal.

Finalmente, extiendo mi más sincero reconocimiento a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron con su apoyo, aliento y comprensión a lo largo de esta travesía académica.

Joselyn Barrigas

AGRADECIMIENTO

Le agradecemos a Dios por ser la luz de nuestro camino durante nuestra formación profesional.

A nuestros padres quienes han sido el soporte esencial de nuestra vida. Su respaldo inquebrantable y cariño sin límites se han manifestado a lo largo de toda nuestra trayectoria educativa. Les agradecemos por su permanente atención, por compartir su sabiduría y por alentarnos continuamente.

A la Mgs. Carla Silva y al MsC. Marco Rodríguez, quienes con su amplio conocimiento supieron guiarnos en el desarrollo del presente trabajo de titulación. Ha sido un verdadero privilegio y una gran dicha haberlos encontrado en nuestro camino y disfrutar de su compañía en cada momento compartido.

A la Carrera de Ingeniería Ambiental que nos abrió las puertas del saber, lugar en que recibimos los conocimientos académicos necesarios para nuestra formación profesional. A fondos de páramo de Tungurahua y Condesan por brindarnos financiamiento y apoyo para llevar a cabo la realización del proyecto de titulación: Estimación del contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata, Provincia de Tungurahua.

A todas las personas que de una u otra manera nos han orientado en ciertos aspectos importantes para el desarrollo y culminación de nuestro trabajo de investigación.

A todos ellos gracias...

Joselyn Barrigas, Angie Navas

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

COS	Carbono orgánico del suelo
MOS	Materia orgánica del suelo
CO ₂	Dióxido de carbono
USD	United states dollar (dólares americanos)
NaF	Fluoruro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
KCl	Cloruro de potasio
Dap	Densidad aparente
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Ps	Pasto
Cu	Cultivo
SIG	Sistemas de Información Geográfica

ÍNDICE

DECLARATORÍA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I	16
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	18
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 Objetivo general:	19
1.4.2 Objetivos específicos:	19
CAPÍTULO II	20
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 ECOSISTEMAS DE PÁRAMO	20
2.2 IMPORTANCIA DE LOS PÁRAMOS	20
2.3 TIPOLOGÍA DE LOS SUELOS DEL ECOSISTEMA PÁRAMO	20
2.3.1 Formación	20
2.3.2 Características de los suelos	20
2.3.3 Clase de suelo del área de estudio	21
2.4 TAXONOMÍA DEL PÁRAMO DEL IGUALATA	21
2.4.1 Andisoles	21
2.4.2 Molisoles	21
2.5 PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS	21
2.5.1 Color	21
2.5.2 Textura	22
2.5.3 pH	22

2.5.4	Estructura	22
2.5.5	Densidad aparente.....	22
2.5.6	Test de NaF	22
2.6	MATERIA ORGÁNICA	23
2.7	CARBONO	23
CAPÍTULO III.....		24
3.	METODOLOGIA	24
3.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	24
3.2	PUNTOS DE MUESTREO	25
3.3	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	25
3.4	MUESTREO DE CAMPO	25
3.4.1	Recolección de muestras en suelo bajo páramo	25
3.4.2	Recolección de muestras en suelo bajo pasto y cultivo	27
3.5	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	28
3.5.1	Test de NaF	28
3.5.2	Color	28
3.5.3	Textura	28
3.5.4	Estructura	30
3.5.5	Porcentaje de humedad	30
3.5.6	Densidad aparente (Dap).....	30
3.5.7	Espacio poroso (EP)	30
3.5.8	pH del suelo.....	30
3.5.9	Determinación de carbono en el suelo (COS).....	31
3.6	VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO.....	31
3.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	32
CAPÍTULO IV.		33
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO BAJO PÁRAMO, PASTO Y CULTIVO A UNA PROFUNDIDAD DE 0 – 30 CM Y 30 – 60 CM	33
4.1.1	Color	33
4.1.2	Textura	35
4.1.3	Estructura	36

4.1.4	Densidad aparente (Dap).....	37
4.1.5	Humedad	39
4.1.6	pH	41
4.1.7	Test de NaF	43
4.1.8	Carbono orgánico	44
4.2	CONTENIDO DE CARBONO COMO UN SERVICIO ECOSISTÉMICO QUE OFERTA EL PÁRAMO DEL IGUALATA	46
	CAPÍTULO V.....	48
5.	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	48
5.1	CONCLUSIONES.....	48
5.2	RECOMENDACIONES.....	49
6.	BIBLIOGRÁFIA.....	50
7.	ANEXOS	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de muestras por usos de suelo.....	26
Tabla 2. Metodología para la determinación de la textura del suelo	29
Tabla 33. Valor económico de CO de los diferentes usos de suelo.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio (Zona alta Quebrada Hualcanga, Páramo Igualata).	24
Figura 2. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo	26
Figura 3. Metodología para la toma de muestras en sus diferentes usos.	27
Figura 4. Metodología para la toma de muestras por parcela en sus diferentes usos.	27
Figura 5. Color del suelo a una profundidad de 0-30 cm.....	34
Figura 6. Color del suelo a una profundidad de 30-60.	35
Figura 7. Clases de textura de cada uso de suelo a una profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm.	36
Figura 8. Estructura de los diferentes usos de suelo 0-30 cm y 30-60 cm.....	37
Figura 9. Dap 0-30 (Usos de suelo)	38
Figura 10. Dap 30-60 (Usos de suelo)	39
Figura 11. Humedad (0-30) cm	40
Figura 12. Humedad (30-60) cm	41
Figura 13. pH (0-30) (Usos de suelo)	42
Figura 14. pH (30-60) (Usos de suelo)	43
Figura 15. Test de NaF.....	44
Figura 16. Carbono orgánico (0-30) cm.....	45
Figura 17. Carbono orgánico (30-60) cm.....	46
Figura 18. Mercado de Carbono fijado en países de América Latina y el Caribe.....	47

RESUMEN

Los páramos son ecosistemas vitales que proporcionan servicios esenciales como el almacenamiento de carbono y el suministro de agua. Sin embargo, con el paso del tiempo, estos valiosos ecosistemas han sufrido una reducción significativa de su extensión. Esto se debe principalmente a dos factores: la expansión de las actividades agrícolas y ganaderas. Ante esta situación, se hace imprescindible valorar los servicios que los páramos ofrecen, tanto desde una perspectiva ecológica como económica. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue estimar el contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata, provincia de Tungurahua. Se analizaron 3 usos de suelo: páramo, pasto y cultivo, en los cuales se recolectaron muestras compuestas (24 en páramo, 8 en pastizales y 8 en áreas de cultivo). Estas muestras se tomaron a dos profundidades distintas: de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm. Los parámetros fisicoquímicos analizados fueron: color, textura, estructura, densidad aparente (Dap), Test del NaF, pH, humedad y carbono orgánico (CO). La cuantificación del contenido de carbono reveló diferencias significativas entre los diferentes usos de suelo. El páramo mostró la mayor capacidad de almacenamiento, con un valor medio de 105,92 Mg/ha. Los suelos dedicados a cultivos presentaron un valor medio ligeramente inferior, de 102,57 Mg/ha, mientras que las áreas de pastizales registraron el valor más bajo, con 100,52 Mg/ha. Esto indica que el páramo presenta una alta capacidad de captura de carbono (391 TCO₂/ha), lo que representa en el mercado un valor de 0,86 millones de dólares, evidenciando así que las áreas de páramo desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de carbono y en la lucha contra el cambio climático.

Palabras claves: materia orgánica, valoración económica, conservación, usos de suelo.

ABSTRACT

Moorlands are vital ecosystems that provide essential services such as carbon storage and water supply. However, over time, these valuable ecosystems have significantly reduced their extent. Moorland is mainly due to the expansion of agricultural and livestock activities. It is essential to assess the moorlands' services from an ecological and economic perspective. In this context, the objective of this study was to estimate the soil carbon content in the upper zone of the Quebrada Hualcanga, Igualata's Moorlands, province of Tungurahua. Three land uses were analyzed: páramo, pasture, and crop, in which composite samples were collected (24 in páramo, 8 in pastures, and 8 in cultivated areas). These samples were taken at two different depths: 0 to 30 cm and 30 to 60 cm. The physicochemical parameters analyzed were color, texture, structure, bulk density (Dap), NaF test, pH, humidity, and organic carbon (CO). The quantification of carbon content revealed significant differences between different land uses. The moorlands showed the highest storage capacity, with an average value of 105.92 Mg/ha. Soils dedicated to crops had a slightly lower mean value of 102.57 mg/ha, while pasture areas recorded the lowest value, with 100.52 mg/ha. This indicates that the moorland has a high carbon capture capacity (391 TC/ha), representing a market value of 0.86 million dollars, thus evidencing that páramo areas play a crucial role in carbon storage and in the fight against climate change.

Keywords: organic matter, economic valuation, conservation, land uses.



Tirado electrónicamente por:
ANA ELIZABETH
MALDONADO LEÓN

Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León
ENGLISH PROFESSOR
C.I.0601975980

CAPÍTULO I.

1.1 INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas de alta montaña que se encuentran desde Costa Rica hasta los Andes del norte de Colombia, Ecuador, Venezuela y Perú. En Ecuador, ocupan un área de 1,833,834 hectáreas, lo que equivale al 5% del territorio nacional. Estos ecosistemas albergan una gran diversidad de especies y actúan como importantes reservorios de carbono en el suelo, además de ser una fuente vital de agua (García et al., 2019).

En el estudio realizado por García et al., (2019) indica que, a nivel global aproximadamente el 5% del carbono se encuentra secuestrado en el suelo del ecosistema páramo, superando la cantidad almacenada en suelos forestales. Es importante destacar que, en nuestro país, los páramos pueden almacenar hasta 230 toneladas de carbono por hectárea.

El páramo del Igualata no escapa de esta realidad debido a que presenta servicios ecosistémicos como el carbono y el agua, este último utilizado por las comunidades de la parte baja del sector tanto para consumo humano como para riego. Lamentablemente, a lo largo del tiempo se ha ido perdiendo parte de su área debido a la expansión de la frontera agropecuaria y la implementación de prácticas de reforestación inadecuadas mediante la introducción de especies exóticas como el *Pinus radiata* L. y *Eucalyptus globulus* (Rosero, 2016).

En este sentido el Gobierno Provincial de Tungurahua reconoce la importancia de los servicios ambientales que ofrece el páramo, un ejemplo de ello es el Plan de Manejo de Páramos (PMP) del Frente Sur Occidental (FSO), el cual fue financiado por esta institución, a través del Fideicomiso Fondo de Manejo de Páramos y Lucha Contra la Pobreza (FMPLPT) y actualmente ejecutado por la Mancomunidad del FSO. El objetivo de esta iniciativa fue resaltar la importancia de este servicio ambiental ante las comunidades locales y de la provincia, promoviendo acciones para conservar el ecosistema páramo y evitar el avance de la frontera agropecuaria y hacer frente a los efectos del cambio climático (Ferrari & Salvador, 2021).

En base a lo anterior la presente investigación, determinó la cantidad de carbono orgánico presente en el suelo utilizando el método LOI (Loss-On-Ignition), el cual permitió estimar el contenido de carbono a través de la quema controlada de muestras de suelo. La información actualizada servirá como insumo en la implementación de medidas de conservación mediante un mecanismo de desarrollo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los páramos, siendo ecosistemas esenciales en términos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos, son especialmente vulnerables a la erosión y el deterioro (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019). El páramo de Igualata juega un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y en la prestación de servicios ecosistémicos. No obstante, la expansión de la frontera agrícola ha provocado una preocupante pérdida de suelo debido a la erosión, lo que afecta la capacidad del suelo para retener y almacenar carbono (Chuncho Morocho & Chuncho, 2019).

A nivel global, aproximadamente el 50% del carbono total presente en el suelo corresponde al carbono orgánico. La cantidad de este elemento en los suelos puede variar significativamente en diferentes regiones del mundo debido a diversos factores como el clima, la vegetación y la actividad humana (Glez, 2023). El contenido de carbono en el suelo es esencial para evaluar su salud, debido a que los suelos ricos en carbono son fértiles y poseen una mayor capacidad de retener agua, lo que los hace más resilientes ante la sequía y la erosión. Sin embargo, se estima que alrededor del 20% del carbono presente en los suelos a nivel mundial ha disminuido debido a actividades humanas (FAO, 2023).

La degradación del suelo y la deforestación pueden ocasionar una liberación masiva y rápida de carbono hacia la atmósfera. Estos efectos representan una amenaza tanto para las comunidades locales cercanas como para la biodiversidad.

Actualmente, no se ha realizado una investigación previa sobre el contenido de carbono en el área de estudio. Por lo tanto, este trabajo de investigación busca responder a la pregunta: ¿Cuánto carbono se almacena en los diferentes usos de suelo en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata? Con el fin de contar con datos sobre la cantidad de carbono almacenado en este ecosistema que sirvan de base para contribuir a la preservación y sostenibilidad a largo plazo del páramo de Igualata y sus ecosistemas asociados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los páramos de Ecuador abarcan alrededor del 5% de su territorio total y se consideran ecosistemas delicados de alta montaña que desempeñan un papel crucial en la regulación del clima y el ciclo hidrológico. Además, estos ecosistemas son de gran valor para las comunidades locales, puesto que generan ingresos económicos mediante la producción agrícola, el turismo y la recreación, lo que contribuye al desarrollo en la zona (Chuncho Morocho & Chuncho, 2019).

La protección adecuada del páramo de Igualata es crucial para prevenir la emisión de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, reducir el efecto invernadero y establecer una medida efectiva de conservación del páramo. Para lograr esto, se deben evitar prácticas que provoquen la quema de su vegetación natural, la erosión del suelo, la alteración ambiental causada por las actividades agrícolas y ganaderas, la caza furtiva, la introducción de especies y la afectación a los humedales del páramo (Carrasco & Padilla, 2016).

Tanto la biodiversidad como el carbono orgánico del suelo (COS) desempeñan roles cruciales en la regulación y mantenimiento de los ecosistemas debido a su estrecha relación mediante diversos procesos, como la descomposición de la materia orgánica. El COS es esencial para regular el clima, mantener la estabilidad del suelo, proporcionar nutrientes a las plantas, retener agua y preservar la biodiversidad del suelo, al ser el hábitat primario de los organismos edáficos (Muñoz et al., 2021).

Los cambios experimentados en la comunidad adyacente al páramo del Igualata incluyen la disminución de la disponibilidad de agua para consumo humano, en la parte de Quero, Tungurahua, así como la variabilidad climática, agravada por la continua expansión de la frontera agrícola. Por lo que, el propósito de este estudio es determinar y cuantificar la cantidad de carbono almacenado en el suelo del páramo del Igualata. Esto permitirá identificar áreas prioritarias para la conservación y establecer estrategias efectivas para la protección y restauración de estos ecosistemas. Asimismo, proporcionará información relevante para el diseño de políticas públicas y la implementación de prácticas sostenibles en sectores como la agricultura y la ganadería, que tienen un impacto directo en el uso del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero (Llambí et al., 2019).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general:

- Estimar el contenido de carbono edáfico en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, Páramo del Igualata, provincia de Tungurahua.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Determinar los parámetros físico-químicos del suelo bajo páramo, pasto y cultivo a una profundidad de 0 – 30 cm y 30 – 60 cm.
- Cuantificar el contenido de carbono como un servicio ecosistémico que oferta el páramo del Igualata.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ECOSISTEMAS DE PÁRAMO

Los páramos representan ecosistemas de gran importancia estratégica, debido a su contribución esencial en los ciclos hidrológicos, del carbono y los nutrientes a nivel regional y global. Estos ecosistemas son reconocidos como "torres de agua", ya que proveen servicios ecosistémicos fundamentales al transferir recursos hídricos desde las zonas montañosas hacia las áreas de menor altitud en las vertientes Pacífica, Caribe y Amazónica. Además, los páramos albergan una alta biodiversidad y poseen un notable valor cultural y natural para las comunidades locales. No obstante, debido a su fragilidad, están altamente expuestos a las actividades antrópicas y a los cambios ambientales y climáticos (Atuk, 2021).

2.2 IMPORTANCIA DE LOS PÁRAMOS

Los servicios ecosistémicos se pueden conceptualizar como los rendimientos obtenidos por las comunidades humanas a través de las funciones inherentes de los ecosistemas, tanto de forma directa como indirecta. La diversidad de estos servicios ofrecidos por los ecosistemas puede ser clasificada en diversas categorías, con el propósito de simplificar su evaluación e identificación (Pinos et al., 2021).

Los páramos albergan una variedad de servicios ecosistémicos de gran importancia en los ámbitos biológico, hidrológico, social, cultural y económico. Uno de estos servicios es la regulación de la captura y contenido de carbono, que se logra mediante la formación de sumideros de carbono cuando la materia orgánica se mantiene aislada del oxígeno (Ayala et al., 2014).

2.3 TIPOLOGÍA DE LOS SUELOS DEL ECOSISTEMA PÁRAMO

2.3.1 Formación

Los suelos de páramo comenzaron a formarse hace unos 10.000 años, luego de la última glaciación del Pleistoceno que cubrió la zona con hielo. Durante esta época se derritieron los glaciares, por lo que las rocas quedaron expuestas y empezó el proceso de meteorización, esto conllevo a la formación de los suelos de páramo. En áreas volcánicas, estos suelos se desarrollan a partir de las cenizas volcánicas. Además, debido a las bajas temperaturas, la formación de suelos es lenta, por lo que son generalmente jóvenes. Cuatro factores condicionan su formación: el clima frío, el tipo de roca madre, la corta edad de los suelos y la vegetación presente (Hofstede et al., 2014).

2.3.2 Características de los suelos

Los suelos típicos de páramo son negros, húmedos y ácidos, con una alta capacidad de retención de agua. En las elevaciones medias, son cafés o negros, mientras que en las zonas más bajas son muy oscuros, con acidez moderada y alto contenido de agua, potasio y nitrógeno (Mena et al., 2000).

Debido a las bajas temperaturas y la alta humedad del páramo, los procesos de descomposición de materia orgánica ocurren lentamente. Esto provoca la acumulación de

una espesa capa de suelo rico en nutrientes, el cual es retenido por un entramado de raíces y rizomas de las plantas nativas que forman una cubierta vegetal continuo, característica de los páramos en buen estado de conservación (Mena et al., 2000).

2.3.3 Clase de suelo del área de estudio

Los páramos de las regiones centro y norte del Ecuador, se ubican en gran parte sobre volcanes activos. Por consiguiente, los suelos de estas regiones se formaron a partir de la meteorización de cenizas volcánicas y son conocidos como andosoles o andisoles (Hofstede et al., 2014).

2.4 TAXONOMÍA DEL PÁRAMO DEL IGUALATA

2.4.1 Andisoles

Los andisoles son suelos típicos que se encuentran en las regiones montañosas de Ecuador, se desarrollaron a partir de depósitos volcánicos. Presentan un grado de evolución de poco a moderado, con colores oscuros. Contienen una alta proporción de compuestos amorfos y tienen una elevada capacidad de retención de agua, así como de fijación de fósforo y potasio, debido a su alto contenido en óxidos de aluminio.

Estos suelos muestran texturas francas a franco limosas, con alta porosidad, baja densidad aparente -menor a 0,9 g/cc- y una elevada capacidad de retención de agua (Prat, 2019).

2.4.2 Molisoles

Los Mollisoles son suelos oscuros, ricos en materia orgánica y fértiles. Por lo general, se forman bajo una cobertura de pastizales, aunque existen algunas excepciones.

Presentan propiedades físicas favorables, como una buena estructura, capacidad de retención de agua y permeabilidad adecuada. Tienen texturas francas, son suelos bien drenados, con altos niveles de saturación de bases y porcentajes también elevados de materia orgánica. Dependiendo de su pendiente, el uso potencial de los Mollisoles varía desde suelos aptos para el cultivo y la explotación forestal, hasta zonas de protección y conservación de flora y fauna (Prat, 2019).

2.5 PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS

Los parámetros físico-químicos desempeñan un papel crucial en los suelos de páramo debido a su influencia en la funcionalidad y la capacidad de sostén de este ecosistema. Estos parámetros son fundamentales para comprender la dinámica del suelo y su capacidad para soportar la vida vegetal y animal en estas altas y frágiles regiones. En este sentido, las propiedades físicas del suelo, como su textura, estructura y porosidad son determinantes en la retención y disponibilidad de agua. Por otro lado, los parámetros químicos del suelo están relacionados con la calidad del agua y los nutrientes disponibles (León et al., 2022).

2.5.1 Color

El color del suelo indica su composición y las condiciones de oxido-reducción que ha tenido en el pasado y en el presente. Generalmente el color está determinado por partículas

muy pequeñas de materia orgánica descompuesta (de color oscuro), óxidos de hierro (amarillo, marrón, naranja y rojo), óxidos de manganeso (negro) y otros, o puede deberse al color de la roca madre (Rojas, 2009).

El color de la matriz de cada horizonte del suelo debe registrarse en condiciones de humedad (o en ambas condiciones, seco y húmedo cuando sea posible) usando las notaciones de matiz, valor y croma como se indica en la Tabla de Colores Munsell (Rojas, 2009).

2.5.2 Textura

La textura del suelo es el contenido de partículas de diferentes tamaños, como arena, limo y arcilla. Además, es una propiedad importante, debido a que influye en la fertilidad, la retención de agua, la aireación, el drenaje, el contenido de materia orgánica y otras propiedades de este recurso (FAO, 2019).

2.5.3 pH

El pH del suelo mide su grado de acidez o alcalinidad al entrar en contacto con el agua. Se mide en una escala de 0 a 14, donde 7 es neutro, valores mayores son alcalinos y menores ácidos. Los suelos presentan pH entre 3,5 y 10 de forma natural. Con el tiempo la evolución reduce el pH. En zonas áridas el pH suele ser mayor a 7 y en húmedas es menor. La materia orgánica libera iones de hidrógeno, volviendo ácidos los suelos ricos en ella. Además, la disponibilidad de nutrientes es óptima en un nivel de pH entre 6 y 7 (Cremona & Enríquez, 2020).

La materia orgánica libera iones de hidrógeno, volviendo ácidos los suelos ricos en ella. Algunos nutrientes están más disponibles en pH alcalino y otros en ácido, pero entre 6 y 7 la mayoría tienen buena disponibilidad, por lo que es importante conocer este valor (Cremona & Enríquez, 2020).

2.5.4 Estructura

La composición del suelo es la manera en que se ordenan las partículas individuales de arena, lodo y greda que forman el suelo. La composición del suelo puede ser granulada, puntiaguda o molecular, y se determina por la forma o disposición de los conglomerados individuales. La composición del suelo afecta propiedades como la ventilación, el flujo de agua, el crecimiento de plantas y la formación de una corteza superficial (FAO, 1998).

2.5.5 Densidad aparente

Se refiere a la proporción entre la masa de tierra seca y el volumen total visible de la misma. Este valor es un buen indicador de propiedades clave del suelo, tales como: compresión, capacidad de absorción, nivel de oxigenación y habilidad de infiltración. Esto impacta la circulación de agua y aire en la tierra, los procesos de crecimiento vegetal (brotación, arraigo) y el cuidado del suelo (Rubio, 2010).

2.5.6 Test de NaF

El test de fluoruro sódico, también llamado pH en fluoruro sódico (pH NaF), es una prueba usada para hallar la presencia de materias alofánicas en el suelo. Las materias alofánicas, como el alofano y la imogolita, son primordiales para la fertilidad del suelo. La

prueba consiste en medir el pH de una solución de fluoruro sódico donde se ha puesto una muestra de suelo, y se emplea para reconocer la existencia de estas materias en el suelo (Soto, 2013).

2.6 MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica incluye todo el material de origen animal o vegetal que está descompuesto, parcialmente descompuesto o sin descomponer. El contenido de materia orgánica en los horizontes puede ser estimado a través del color del suelo seco y/o húmedo según la tabla Munsell, considerando su textura. Esta estimación se basa en la suposición de que el color del suelo se debe a la mezcla de sustancias orgánicas oscuras y minerales claros (Rojas, 2009).

2.7 CARBONO

El carbono presente en el suelo es un señalador fundamental de la calidad del suelo y su habilidad para conservar la fertilidad y productividad, así como su función en la mitigación del cambio climático. Distintas técnicas agrícolas, como la rotación de cultivos y el mantenimiento de la materia orgánica, pueden impactar los niveles de carbono en el suelo (Martínez et al., 2008).

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGIA

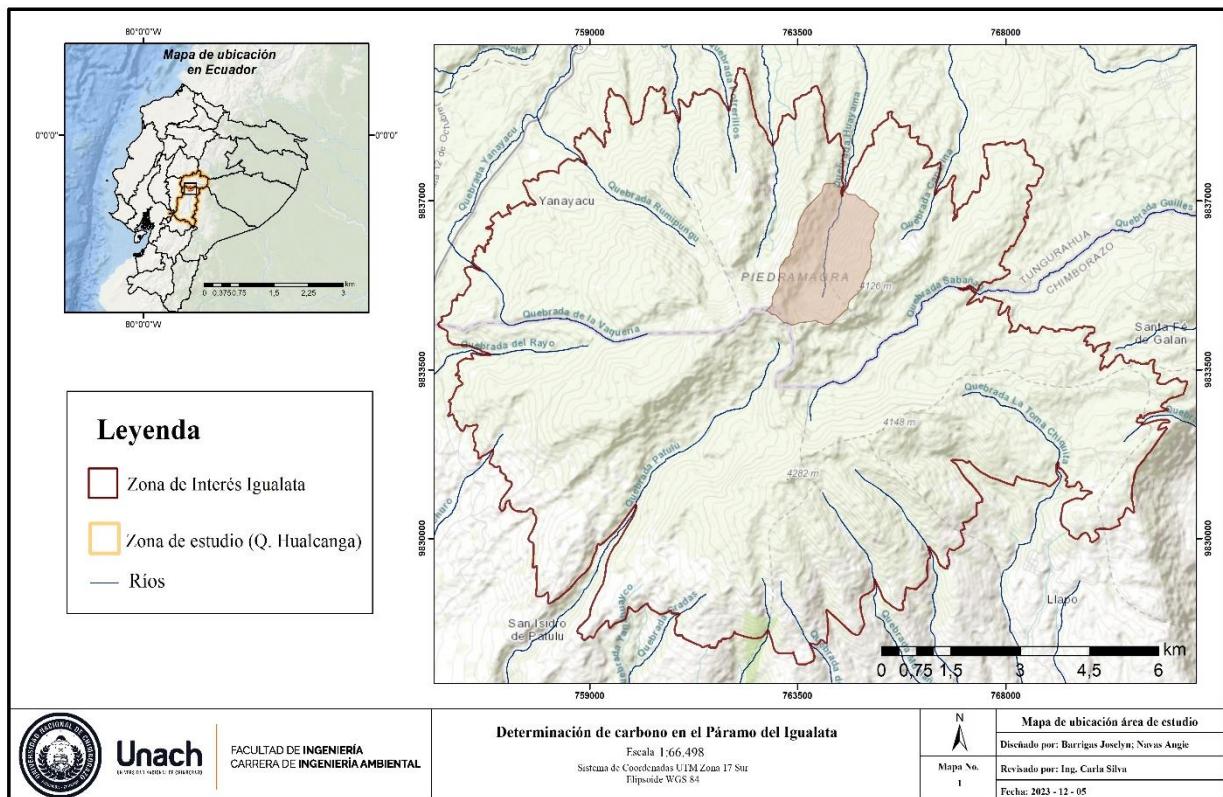
3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El cerro Igualata se encuentra situado en las provincias de Tungurahua y Chimborazo (Figura 1), en las coordenadas (X=762958,73 Y=9833493,06). Se extiende por los cantones Quero, Mocha y Guano. Su altitud varía desde los 3600 m.s.n.m., hasta los 4400 m.s.n.m., y abarca un área de 11938,38 hectáreas.

El área de estudio de la presente investigación se centró en la zona alta de la Quebrada Hualcanga, abarcando únicamente la provincia de Tungurahua, la cual posee una extensión de 6 957.2 ha.

Figura 1

Área de estudio (Zona alta Quebrada Hualcanga, Páramo Igualata).



Nota: La gráfica representa el área de relevancia en el páramo del Igualata, región donde se lleva a cabo la presente investigación.

3.2 PUNTOS DE MUESTREO

Para la obtención de los puntos de muestreo, se realizó un mapa de la zona de estudio donde se colocaron los puntos de muestreo en función de la unidad geológica del ecosistema herbazal de páramo. Para el cálculo del número de muestras se utilizó la Ecuación 1.

$$n = \frac{N * Z\alpha^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z\alpha^2 * p * q} \quad (1)$$

Donde:

n = El tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población o universo.

σ = Desviación estándar de la población que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor constante de 0,5.

Z = Valor que depende del nivel de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor, se lo toma con relación al 95% de confianza equivale a 1,96 (como más usual) o con relación al 99% de confianza equivale 2,58, valor que queda a criterio del investigador.

e = Error de estimación máximo aceptado, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09).

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado.

q = (1-p) = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

Después de haber calculado el número de muestras a recolectar, se empleó Google Earth como recurso para seleccionar de manera aleatoria los puntos de control en todas las áreas geológicas presentes en el páramo, así como en los usos de suelo de pasto y cultivo.

3.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se aplicó un diseño sistemático basado en los usos de suelo presente en zona de estudio, teniendo en cuenta que los suelos deben estar localizados en la misma unidad taxonómica perteneciente al orden Andosol.

3.4 MUESTREO DE CAMPO

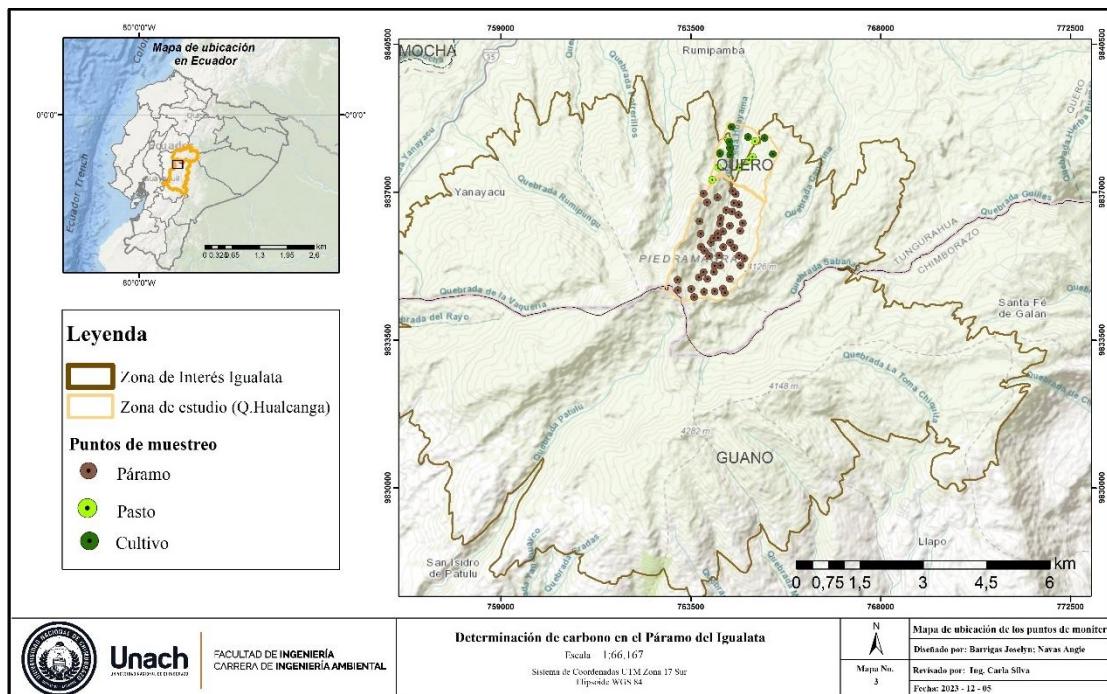
3.4.1 Recolección de muestras en suelo bajo páramo

Las muestras de suelo se recolectaron en cada uno de los usos de suelo del área de estudio (Figura 2), a profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm y el número de muestras está

en función de la extensión de cada uso de suelo (Tabla 1). Las mismas fueron colocadas en fundas herméticas ziploc previamente etiquetadas para su transporte al laboratorio de Edafología de la Facultad de Ingeniería de la UNACH. Para el análisis de la densidad aparente (Dap) se recolectaron muestras de suelo mediante un cilindro de volumen conocido.

Figura 2

Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo



Nota: La gráfica muestra los puntos de monitoreo recolectados en los usos de suelo de páramo, pasto y cultivo, tanto en la Quebrada Hualcanga, la zona de interés del estudio, como en otras áreas del páramo del Igualata.

Tabla 1.

Número de muestras por usos de suelo

Nº	Usos de Suelo	Área (ha)	Nº muestra
1	Páramo	444,87	24
2	Pasto	64,57	8
3	Cultivo	52,57	8
Total		562,01	40

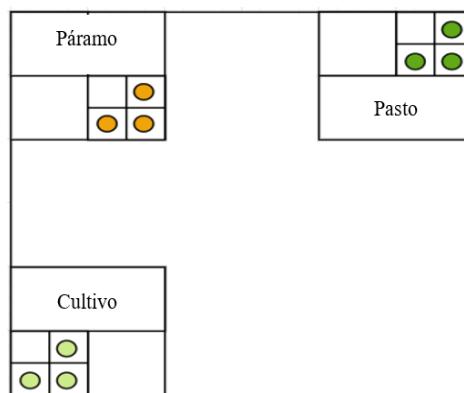
Nota: Esta tabla detalla la cantidad de muestras que se recolectarán en cada unidad geológica y el área correspondiente de cada una en hectáreas.

3.4.2 Recolección de muestras en suelo bajo pasto y cultivo

Las muestras de suelo fueron recolectadas en parcelas de 20 x 20 m, en cada uno de los usos suelos bajo páramo, pasto y cultivo, a dos profundidades distintas de 0-30 cm y de 30-60 cm, en donde se establecieron 5 puntos de muestreo, distribuidos 1 en el centro y 1 en cada extremo de los cuatro vértices (Figura 3) para posteriormente mezclarlas y formar una muestra compuesta (extracción de varias submuestras del mismo volumen y profundidad) (Sosa, 2012). Además, se recolectó una muestra de suelo por medio de un cilindro de volumen conocido, para el cálculo de la densidad aparente.

Figura 3

Metodología para la toma de muestras en sus diferentes usos.

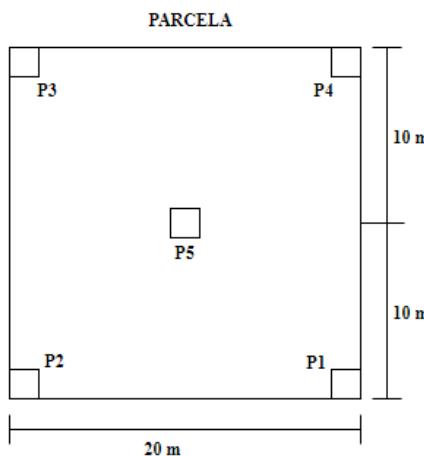


Nota: La gráfica detalla la toma de muestras por parcela en sus diferentes usos de suelos.

En cada parcela se recolectó 5 muestras simples las cuales se mezclaron, para de esta manera obtener la muestra compuesta por cada parcela perteneciente al suelo bajo pasto y cultivo, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Metodología para la toma de muestras por parcela en sus diferentes usos.



Nota: Sosa, D.A (2012). Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

De acuerdo con la “Guía para la Descripción de Suelos” de la (FAO, 2009) se caracterizaron los diferentes usos de suelo, páramo, pasto, cultivo acorde a los siguientes parámetros: color, pH, textura, estructura, densidad aparente, test del NaF, materia orgánica, carbono.

3.5.1 Test de NaF

El test de NaF sirvió para determinar la presencia de aluminosilicatos; este test consistió en colocar una muestra pequeña de suelo sobre papel absorbente para después, añadir de 2 a 3 gotas de fluoruro de sodio y la misma cantidad de fenolftaleína. Si existía aluminosilicatos disueltos, tomará una coloración violeta (FAO, 2022).

Este proceso se realizó para cada muestra y se hizo un total de tres replicas por cada una.

3.5.2 Color

La determinación de color se realizó mediante el diagnostico de matices, valores y cromas como se muestra en la Tabla de Colores de Suelo Munsell. Las lecturas fueron registradas tanto en un suelo seco como húmedo, de cada uno de los diferentes estratos de cada muestra recolectada (FAO, 2009).

3.5.3 Textura

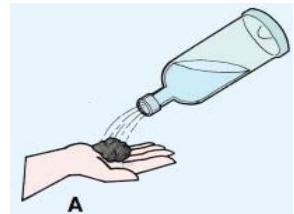
Para determinar la textura del suelo se utilizó el método de sensibilidad del tacto (organoléptico) y prueba de manipulación, el cual permitió evaluar la ocurrencia relativa de arena, limo y arcilla (FAO, 2009).

La prueba de manipulación dio una idea mejor de la textura del suelo. Esta prueba se realizó de acuerdo con la tabla 2.

Tabla 2.

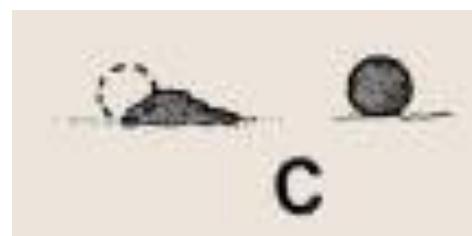
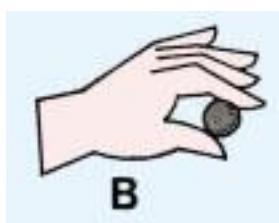
Metodología para la determinación de la textura del suelo

Se tomó una muestra de suelo (A); y se mojó un poco en la mano hasta que sus partículas comenzaron a unirse, pero sin que se adhiera a la mano;



Deje caer la bola (C);

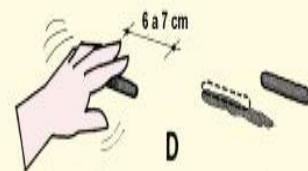
Amase la muestra de suelo hasta que forme una bola de unos 3 cm de diámetro (B);



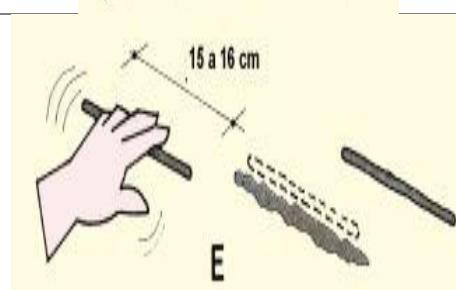
C

Si se desmorona, es arena.

Si mantiene la cohesión, prosiga con el siguiente paso. Amase la bola en forma de un cilindro de 6 a 7 cm, de longitud (D);

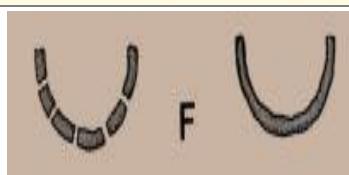


Si no mantiene esa forma, es arenoso franco;
Si mantiene esa forma, prosiga con el siguiente paso. Continúe amasando el cilindro hasta que alcance de 15 a 16 cm de longitud (E);



E

Si no mantiene esa forma es franco arenoso;
Si mantiene esa forma, prosiga con el siguiente paso. Trate de doblar el cilindro hasta formar un semicírculo (F);



F

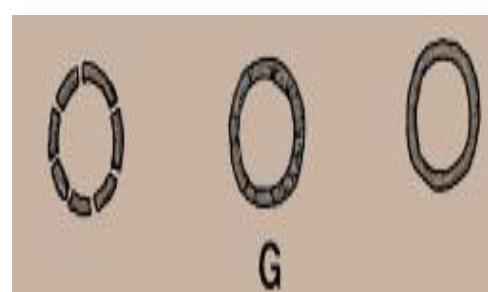
Si no puede, es franco;

Si puede, prosiga con el siguiente paso. Siga doblando el cilindro hasta formar un círculo cerrado (G);

Si no puede, es franco pesado;

Si puede, y se forman ligeras grietas en el cilindro, es arcilla ligera;

Si puede hacerlo sin que el cilindro se agriete, es arcilla.



Nota: FAO (2009). Ensayos de campo rápido para determinar la textura del suelo.

3.5.4 Estructura

La estructura del suelo se determinó mediante la observación directa por medio del estereomicroscopio a una resolución de 100x. Las muestras de suelo fueron colocadas sobre el porta muestras para tomar su respectiva fotografía, y así obtener las mejores condiciones de imagen donde se pudo apreciar la forma, tamaño y disposición de los agregados del suelo.

3.5.5 Porcentaje de humedad

La humedad del suelo se determinó mediante el método gravimétrico, donde la muestra de suelo es colocada en la estufa a 105 °C/24 horas (FAO, 2009), donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas (ecuación 2):

$$HR\% = \frac{\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo seco}}{\text{peso suelo seco}} * 100 \quad (2)$$

3.5.6 Densidad aparente (Dap)

El cálculo de la densidad aparente se realizó mediante el método del cilindro de volumen conocido, sin disturbar la estructura natural del suelo. Este método consistió en tomar una muestra de suelo in situ dentro del cilindro, a una profundidad de 0 a 30 cm. Estas muestras fueron colocadas en fundas plásticas ziploc previamente etiquetadas para su traslado al laboratorio. En laboratorio las muestras fueron previamente pesadas y colocadas en la estufa a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, transcurrido este tiempo fueron pesadas nuevamente para obtener el peso seco (Cargua et al., 2017).

El cálculo de la densidad aparente se presenta en la ecuación (3).

$$Dap = \frac{\text{Masa del suelo seco}}{\text{Volumen total de la muestra}} \quad (3)$$

Nota: la densidad aparente expresada en g/cm³

3.5.7 Espacio poroso (EP)

De acuerdo con la metodología planteada por USDA (1999) la porosidad total se determinará a través de los datos de la densidad aparente, previamente calculados y el valor de densidad real, es decir, aplicando la siguiente ecuación (4):

$$EP \% = 1 - \frac{Dap}{Dr} * 100 \quad (4)$$

3.5.8 pH del suelo

Para cada muestra se siguió los siguientes pasos: en un vaso de precipitación de 50 ml se añadió 10 gramos de suelo y 25 ml de agua destilada; las muestras fueron agitadas durante 30 minutos; luego se realizó la medición del pH, sumergiendo el bulbo del electrodo del pH metro, se esperó hasta que se estabilice el valor para anotar la lectura (FAO, 2022).

3.5.9 Determinación de carbono en el suelo (COS)

La materia orgánica se determinó midiendo y diferenciando el contenido mineral de las mues (Chambers & Beilman, 2011) ignición (LOI) (Chambers & Beilman, 2011). La determinación de carbono y materia orgánica por calcinación se basa en la pérdida de peso de la muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas en este caso se usará una temperatura de 550°C durante 4 horas en la mufla. El método LOI requirió como pretratamiento triturado y tamizado de la muestra para obtener partículas de 150 µm y el secado a 105°C durante 24 horas; para la estimación de COS a partir de la MO se usó el factor de Van Bemmelen de 1,724; que asume que el 58% de la MO está compuesta por carbono.

El cálculo del porcentaje de materia orgánica se presenta en la ecuación (5).

$$\%MOS = \frac{\text{peso a } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso a } 550^{\circ}\text{C}}{\text{peso a } 105^{\circ}\text{C}} * 100 \quad (5)$$

Es así que para el % CO se utilizó la (6).

$$\%COS = \frac{\%MOS}{1,724} \quad (6)$$

Con los resultados de contenido de carbono orgánico y la densidad aparente de las muestras de suelo, se extrapoló a la medida estándar de reporte de contenido de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea), para determinar el contenido actual, de acuerdo con lo establecido por (Castro, 2011) en la ecuación (7).

$$\text{Contenido de C suelo } \left[\frac{\text{tonCO}_2}{\text{ha}} \right] = (Da * P * C * 100) * \frac{44}{12} \quad (7)$$

Dónde:

Da = Densidad del suelo [g/cm³]

P = Profundidad a la que se toma la muestra [cm]

C = Porcentaje en peso de carbono orgánico en el suelo

Nota: 44/12 = La relación 44/12 proviene de la relación estequiométrica de pesos moleculares con la finalidad de conocer cuánto CO₂ puede originarse por la descomposición del carbono orgánico.

3.6 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CONTENIDO DE CARBONO EN EL SUELO

Para calcular la valoración económica del contenido de carbono en ton CO₂/ha (ecuación 6) se multiplicó por cada precio establecido por el Banco mundial (Castro, 2011). El resultado de la (ecuación 6) se extrapoló a toda la superficie del área de estudio, de esa

manera se obtuvo el valor económico total del contenido de carbono para el año actual ecuación (8).

$$V \text{ carbono} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ha}} \right] = \text{Contenido de C suelo} \left[\frac{\text{ton CO}_2}{\text{ha}} \right] * \text{Costo social del C} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton CO}_2} \right] \quad (8)$$

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó pruebas de normalidad para verificar los supuestos del análisis ANOVA agrupando los datos por formación geológica y el contenido de carbono asociado a estas unidades. El análisis ANOVA fue de una sola vía, ($p < 0,05$), para detectar diferencias estadísticas entre tratamientos y pruebas de medias de Tukey. Para este análisis estadístico se utilizó el software MINITAB V17 (Minitab, 2020).

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO BAJO PÁRAMO, PASTO Y CULTIVO A UNA PROFUNDIDAD DE 0 – 30 CM Y 30 – 60 CM

4.1.1 Color

El color es una característica muy notable del suelo, ampliamente utilizada para describirlo, reconocer diferentes grupos genéticos e incluso fue la base de las primeras clasificaciones de suelos hace aproximadamente un siglo. Su adecuada medición reviste gran importancia en numerosos estudios edafológicos, al ser una cualidad clave para caracterizar y diferenciar tipos de suelo (Soto, 2013).

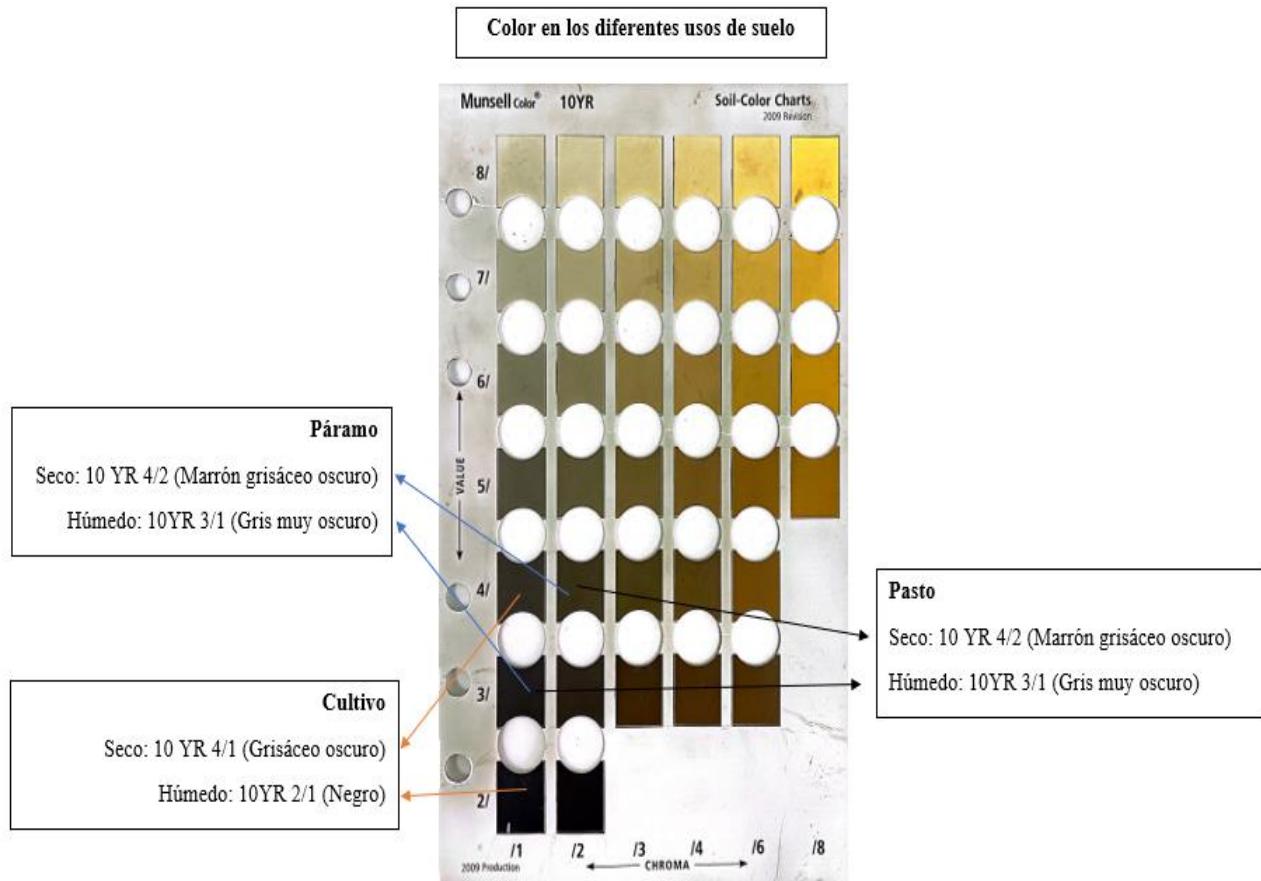
Para interpretar el color del suelo se utilizó la tabla de colores de Munsell y se determinó en condiciones de suelo húmedo y seco. Para la profundidad de 0-30 cm la colorimetría de todos los usos de suelos se ubica en el matiz 10 YR (yellow red).

El color del suelo bajo páramo y pasto presentó una luminosidad (valor) que oscila entre 3 y 4, tanto en estado húmedo como seco. La pureza (croma) varía de 1 a 2 en ambos estados, lo que indica que la intensidad del color se encuentra en un rango de gris muy oscuro a marrón grisáceo oscuro. En contraste, el suelo de cultivo presentó una luminosidad de 2 en estado húmedo y de 4 en seco. La pureza fue de 1 en ambos estados, lo que indica un color que varía de negro a grisáceo oscuro (Figura 5).

De acuerdo con Ciancaglini, (1990), las tonalidades grisáceas oscuras, indican presencia de arenas con una alta concentración de materia orgánica. Esta abundancia de componentes orgánicos se deriva de dos fuentes principales: la flora nativa de la zona y el proceso lento de descomposición de materiales orgánicos. Con el tiempo, esta materia se acumula formando una capa gruesa que otorga al suelo su característico color oscuro (Porta, 2019).

Figura 5

Color del suelo a una profundidad de 0-30 cm.

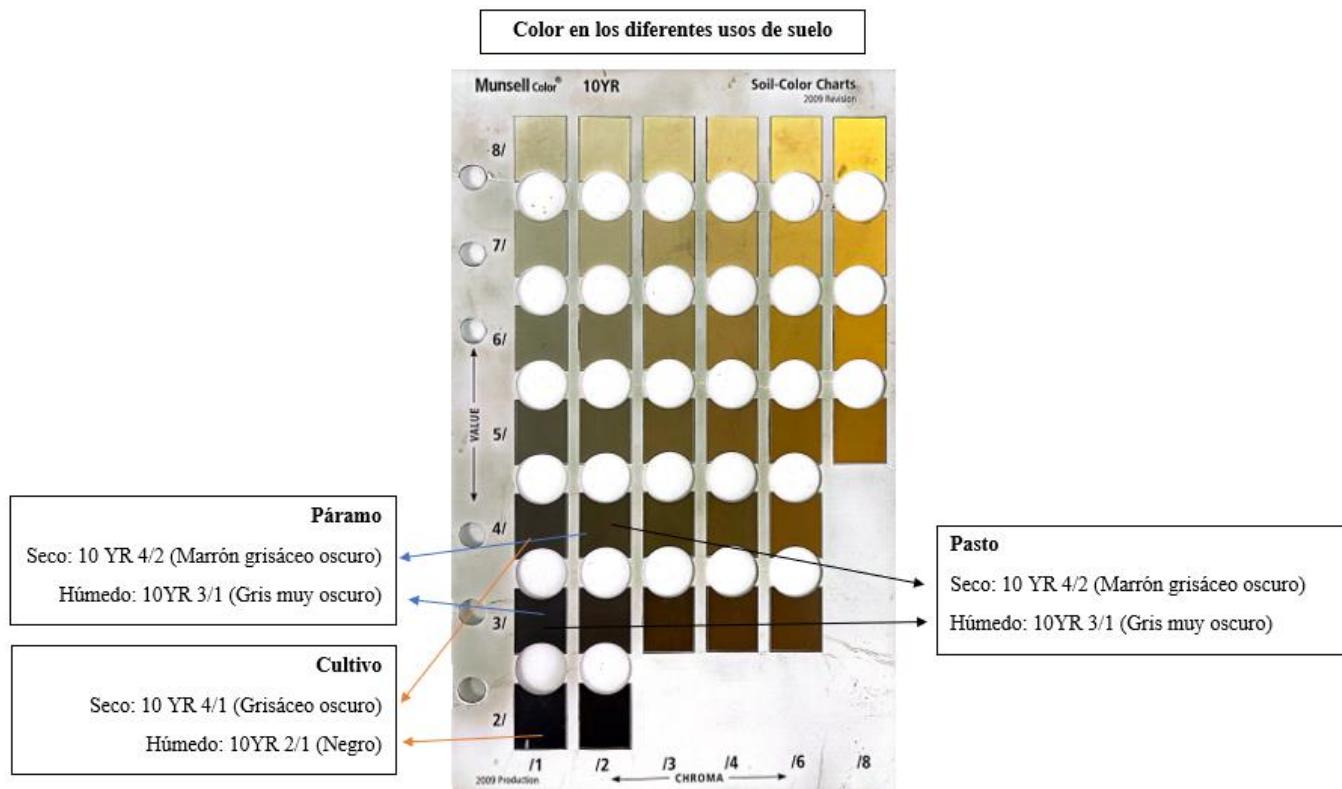


Nota: La gráfica muestra la colorimetría de los diferentes usos de suelo a una profundidad de 0-30 cm.

El color del suelo a una profundidad de 30-60 cm se sitúa en el matiz 10 YR (amarillo rojizo). En las áreas de páramo y pasto, la luminosidad (valor) oscila entre 3 en estado húmedo y 4 en seco, mientras que la pureza (croma) varía de 1 en húmedo a 2 en seco. Esto indica una variación de color de marrón grisáceo oscuro a gris muy oscuro. En cambio, el suelo de cultivo mostró una luminosidad 3 en estado húmedo y 4 en seco. La pureza se mantiene en 1 tanto en estado húmedo como seco, lo que presenta un color que varía de negro a grisáceo oscuro (Figura 6). Estas variaciones en el color del suelo proporcionan información valiosa sobre sus características y composición. Por ejemplo, si las capas minerales del suelo presentan tonos grisáceos, esto podría ser un indicio de condiciones de falta de oxígeno y un drenaje deficiente (Llambí et al., 2012).

Figura 6

Color del suelo a una profundidad de 30-60.



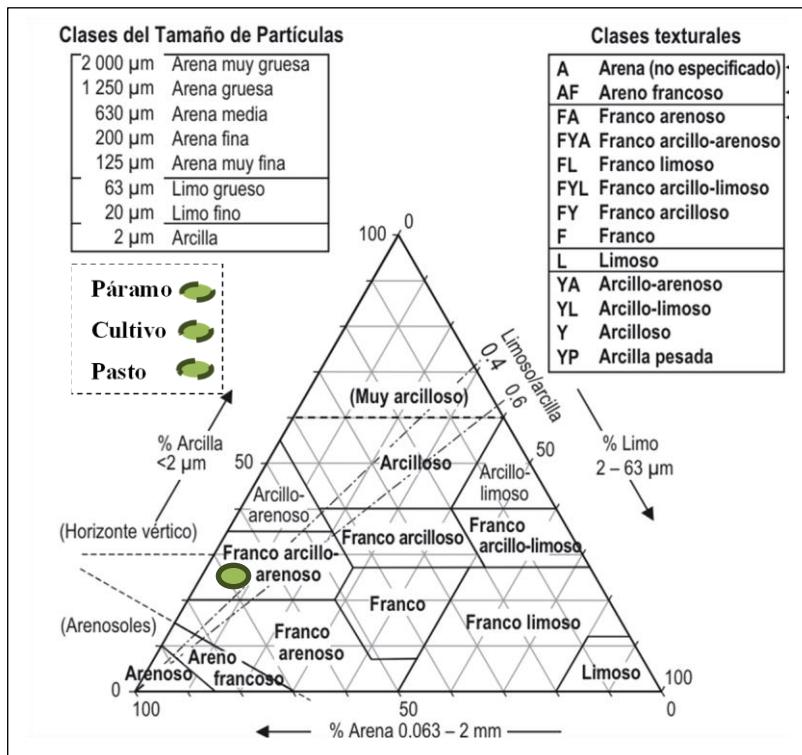
Nota: La gráfica muestra la colorimetría de los diferentes usos de suelo a una profundidad de 30-60 cm.

4.1.2 Textura

La textura se refiere a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla que se encuentran presentes en el suelo. Esta característica influye en otras propiedades del suelo, como la densidad aparente y la porosidad, afectando así el movimiento y almacenamiento de agua y aire en el mismo (Camacho et al., 2017). En los diferentes usos de suelo (páramo, pasto y cultivo) en la zona de estudio, a profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm, la textura que predomina es franco arcillo – arenosa (Figura 7). Esta textura, compuesta por 30% de arcilla, 20% de limo y 50% de arena, contribuye a la retención de humedad y nutrientes (Balmaseda & Ponce De León, 2019).

Figura 7.

Clases de textura de cada uso de suelo a una profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm.



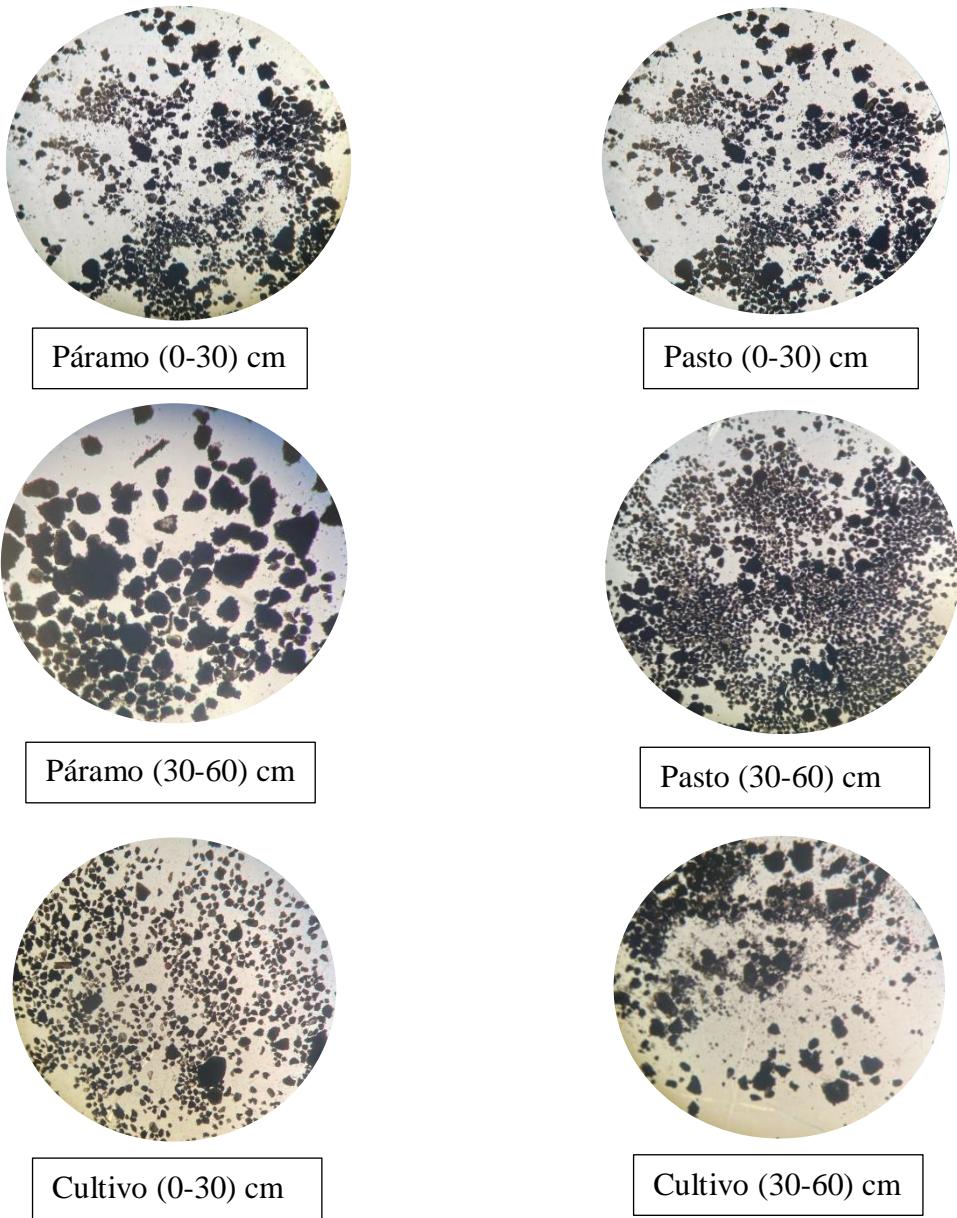
Nota: La figura muestra que clase de textura les pertenece a los diferentes usos de suelo a una profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm.

4.1.3 Estructura

La estructura hace referencia a cómo se organizan y agrupan de forma natural las partículas que componen el suelo, como resultado de los procesos de formación de este. Además, describe la disposición física que presentan dichas partículas en el suelo (FAO, 2009). La estructura predominante en los usos de suelo del área de estudio es de tipo granular en las profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm (Figura 8). Este tipo de estructura se caracteriza por presentar partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños, casi esféricos con superficies curvilíneas o irregular. Esta estructura permite que el agua circule con mucha facilidad a través de estos suelos y está presente en el horizonte A.

Figura 8

Estructura de los diferentes usos de suelo 0-30 cm y 30-60 cm



Nota: La figura representa las texturas encontradas en los diferentes usos de suelo de la presente investigación.

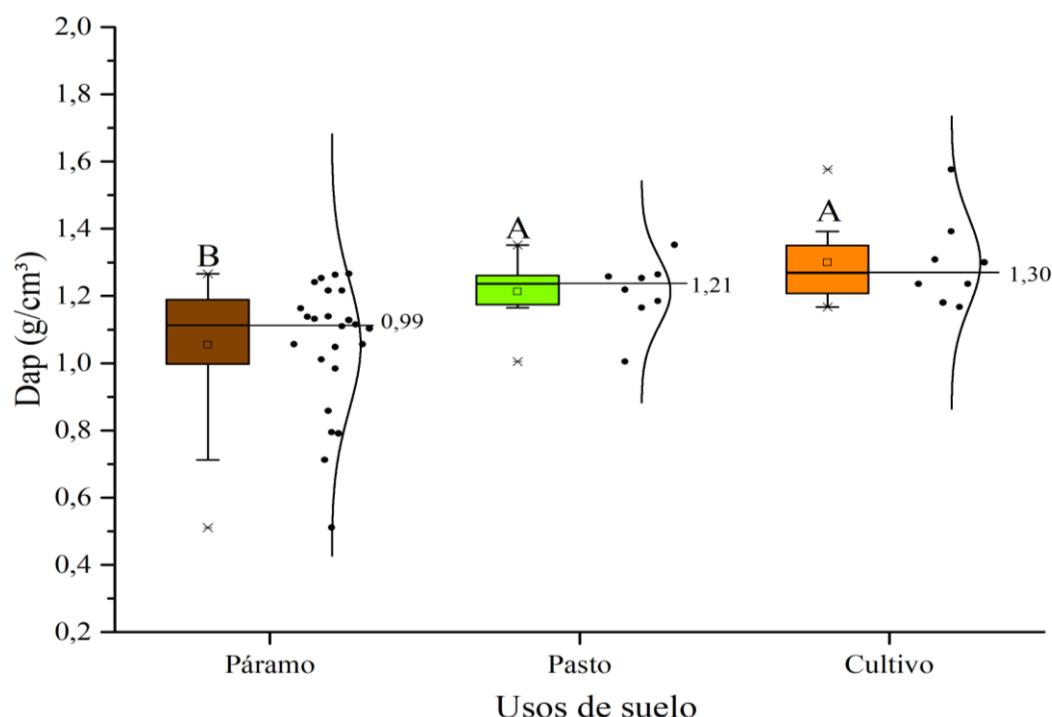
4.1.4 Densidad aparente (Dap)

La Dap del suelo se define como la masa por unidad de volumen de suelo seco y refleja la porosidad total del suelo (FAO, 2009). En la Figura 9, se presentan los valores de Dap de diferentes usos de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm, los mismos presentaron diferencias significativas ($p = 0,000$). El páramo presentó un valor de $0,99 \text{ g/cm}^3$, reflejando un nivel de porosidad medio, característico de un ecosistema no intervenido (Llambí et al., 2012). En contraste, los suelos destinados a cultivos mostraron la mayor densidad aparente promedio con $1,30 \text{ g/cm}^3$, debido a la compactación del suelo por el uso de maquinaria y la

absorción de materia orgánica por los cultivos (Fernández et al., 2019). Los suelos de pasto registraron una Dap de $1,21 \text{ g/cm}^3$, ligeramente inferior a la de los suelos de cultivo, debido a su estructura más abierta y porosa, que facilita una mayor infiltración de agua y aire (Quijano et al., 2022).

Figura 9

Dap 0-30 (Usos de suelo)



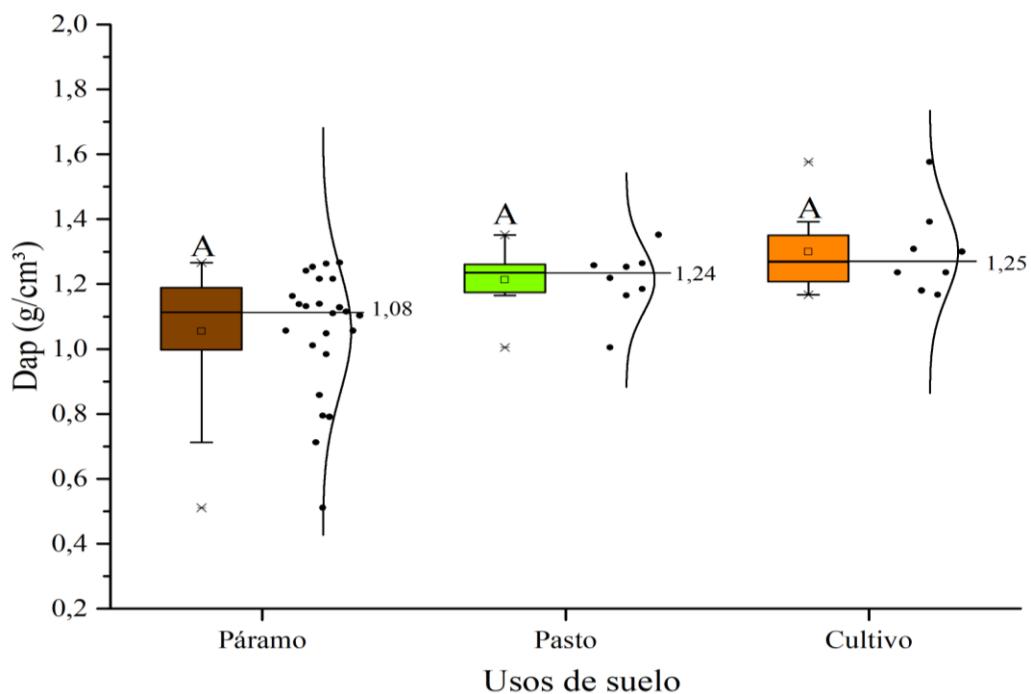
Nota: La figura muestra los promedios de densidad aparente a una profundidad de 0-30 cm obtenidos en los diferentes usos de suelo en la zona de estudio de la presente investigación.

La Figura 10 presenta los valores de la Dap de los diferentes usos de suelo a una profundidad de 30-60 cm, los mismos no presentaron diferencias significativas ($p = 0,105$), puesto que a esta profundidad la estructura del suelo es más estable y homogénea que en la capa superficial. Esto se debe a que las actividades humanas y biológicas tienen menos impacto en esta capa, lo que reduce la variabilidad en la Dap (Quijano et al., 2022). Sin embargo, en comparación con la profundidad de 0-30 cm, la Dap aumentó en los usos de suelo de páramo ($1,08 \text{ g/cm}^3$) y pasto ($1,24 \text{ g/cm}^3$), este incremento se debe a la disminución del contenido de materia orgánica a mayor profundidad, lo cual reduce la estabilidad de los agregados y favorece la compactación (Zúñiga et al., 2018). Por otro lado, el uso de suelo destinado a cultivo presentó una disminución del contenido de Dap ($1,25 \text{ g/cm}^3$) a mayor profundidad. Esta reducción se atribuye a los efectos de las prácticas agrícolas. Antúnez et al. (2015), señalan que el uso de maquinaria pesada y técnicas de labranza tienden a compactar las capas superiores del suelo, lo que resulta en un aumento de la Dap en la

superficie. En contraste, las capas más profundas, menos afectadas por estas prácticas, mantienen una estructura menos compactada y, por ende, una menor densidad aparente.

Figura 10

Dap 30-60 (Usos de suelo)



Nota: La figura presenta los promedios de Dap a una profundidad de 30-60 cm para los distintos usos del suelo en la zona de estudio de esta investigación.

4.1.5 Humedad

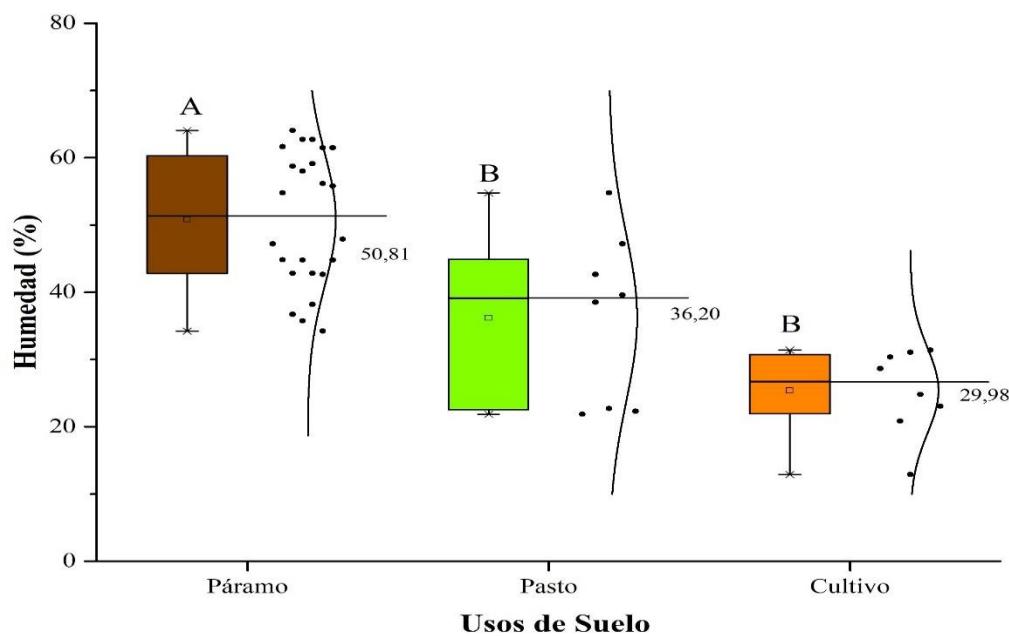
La humedad del suelo es la cantidad de agua presente en los espacios porosos entre las partículas sólidas que conforman el suelo. Esta depende de factores como el clima, la vegetación, la profundidad y propiedades fisicoquímicas del suelo, especialmente el contenido de materia orgánica que influye en la capacidad de retención de agua (Quichimbo et al., 2012).

La Figura 11 muestra los valores de humedad dentro de la zona de estudio a una profundidad de 0-30 cm, aquellos presentaron diferencias significativas ($p= 0,000$) debido a la variación en su cobertura vegetal y condiciones microclimáticas. El páramo obtuvo un valor de humedad de 50,81%, esto según (Vallejo & Calvache, 2005), los niveles de humedad más elevados se encontrarían en el ecosistema de páramo, debido a que se ubica en áreas montañosas de gran altitud donde prevalecen condiciones climáticas frías y muy lluviosas con precipitaciones abundantes casi constantes. En cambio, en los suelos de cultivo se evidenció el menor porcentaje de humedad con un 29,98%, esto se debe a sus propiedades

y el manejo antrópico al que están sujetos, no favorecen la acumulación y permanencia del agua en el suelo de manera significativa (Yaguache, 2022).

Figura 11

Humedad (0-30) cm

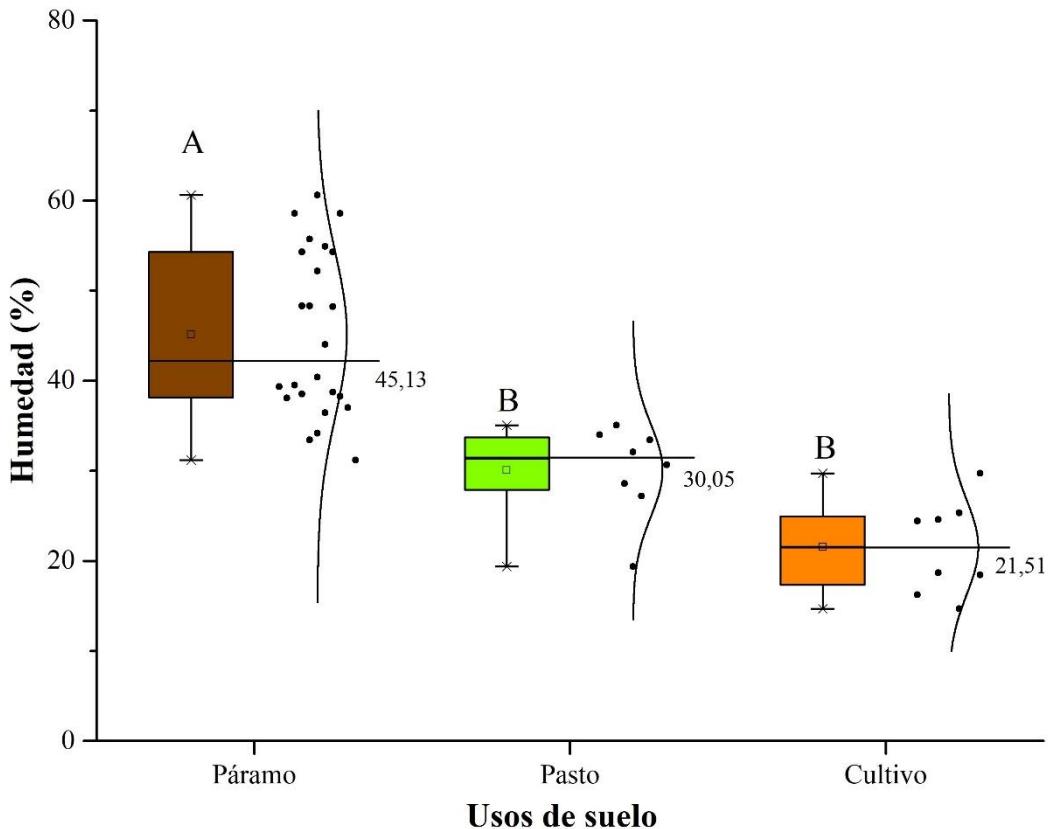


Nota: La figura muestra el porcentaje de humedad respecto a los diferentes usos de suelo a una profundidad de 0-30 cm.

Al analizar la humedad del suelo dentro del área de investigación a una profundidad de 30-60 cm, presentaron diferencia significativa ($p= 0,000$). En este sentido, el páramo alcanzó el mayor porcentaje de humedad con 45,13%, en contraste con pasto con un 30,05% y cultivo mostrando una disminución del 21,51% (Ver Figura 12). Este hecho se debe a que el páramo, con su vegetación autóctona, representa la cobertura que mayormente propicia el almacenamiento de agua debido a sus características intrínsecas. En contraposición, los suelos cubiertos por pastizales y cultivos agrícolas se perfilan como los de menor relevancia para la conservación de reservas hídricas, por consecuencia de los impactos antrópicos a los que están expuestos estos suelos, esto conlleva a una degradación progresiva que disminuye su aptitud para conservar la humedad natural (Yaguache, 2022).

Figura 12

Humedad (30-60) cm



Nota: La figura muestra el porcentaje de humedad respecto a los diferentes usos de suelo a una profundidad de 30-60 cm.

4.1.6 pH

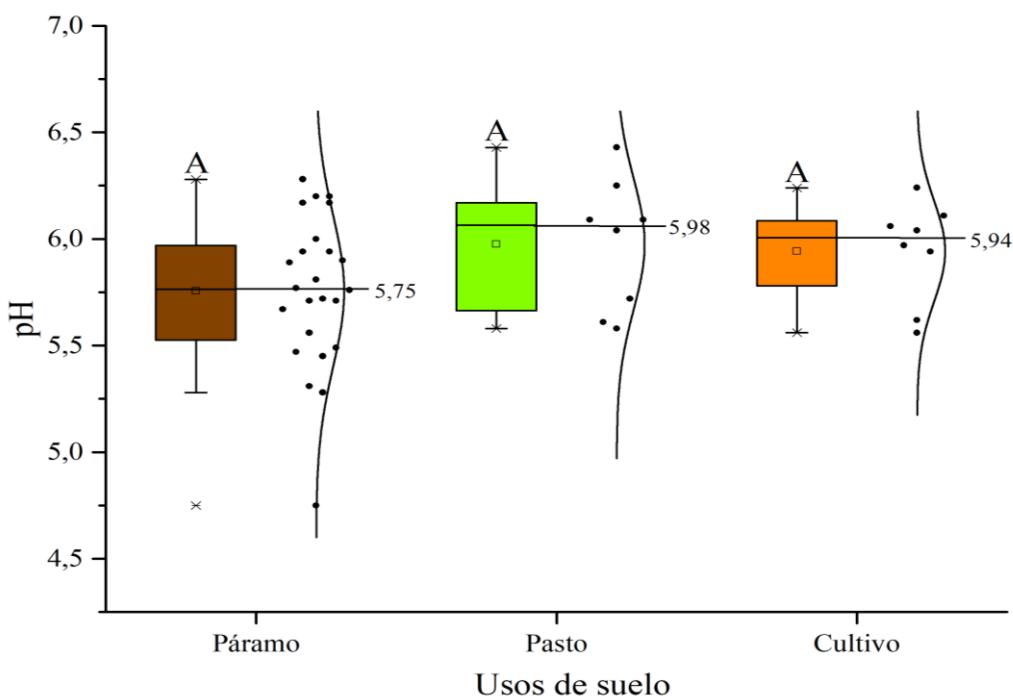
El pH del suelo indica la actividad de los iones de hidrógeno en la solución del suelo y afecta tanto la disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas como varios procesos del suelo (Rivera et al., 2018). La Figura 13 presenta los valores de pH en el área estudiada a una profundidad de 0-30 cm, los mismos no presentaron diferencias significativas ($p = 0,169$). Los valores de pH obtenidos oscilaron entre 5,76 y 5,98, lo que indica que todos los suelos analizados presentan condiciones moderadamente ácidas. Sin embargo, es importante resaltar que existen variaciones en el grado de acidez según el uso del suelo.

En el caso de los suelos agrícolas los valores de pH tienden a ser de medianamente ácidos a neutros. Esta tendencia hacia la neutralidad se debe a que, frecuentemente se aplican enmiendas calizas para corregir la acidez y favorecer el crecimiento de los cultivos (Sadeghian, 2016). Por otro lado, los suelos bajo pastizales tienden a acidificarse debido a varios factores, como la liberación de ácidos orgánicos por la descomposición de los residuos vegetales. Los suelos de páramo se caracterizan por tener un pH más bajo en comparación con los suelos de agricultura y pasto, lo que indica una mayor acidez. Esta característica de

acididad ralentiza el proceso de descomposición de la materia orgánica, como resultado pueden mantener una significativa cantidad de carbono almacenado en el suelo (Agropal, 2017). Esto concuerda con lo reportado por Llambí et al. (2012), quienes indican que estos suelos se caracterizan por ser ácidos, la principal causa de acididad es la presencia de iones de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{+++}) los cuales pueden originarse a partir de las plantas, los minerales arcillosos y la materia orgánica.

Figura 13

pH (0-30) (Usos de suelo)

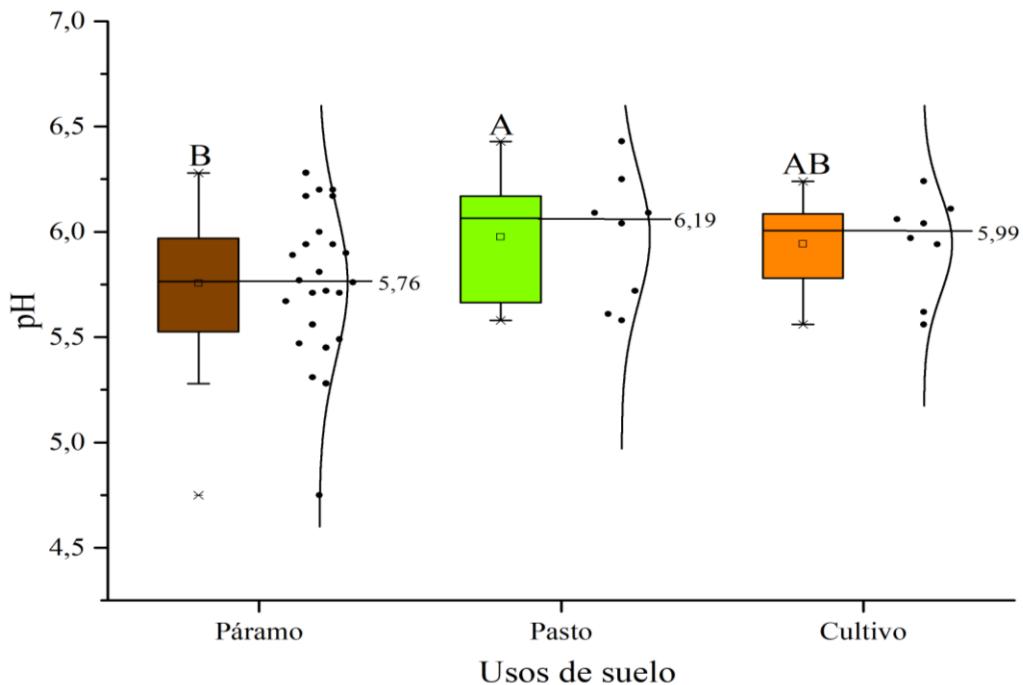


Nota: La figura representa los valores de pH obtenidos a una profundidad de 0-30 cm en los diferentes usos de suelo.

La Figura 14 indica el contenido de pH a una profundidad de 30-60 cm en diferentes usos de suelo, los cuales presentaron diferencias significativas ($p = 0,024$). El pH aumentó en todos los usos comparado con la capa de 0-30 cm. Entre los usos de suelo analizados, el destinado a pasto presentó un valor promedio de pH más alto (6,19), lo cual se ajusta al rango óptimo para este tipo de suelos, que tienden a ser neutros o ligeramente ácidos (Kluepfel & Lippert, 2016). En cuanto al suelo de cultivo, se registró un de pH de 5,99, esto se debe a las prácticas agrícolas aplicadas. Sadeghian (2016), señala que los tratamientos empleados para neutralizar la acididad durante las prácticas de cultivo y labranza en estos suelos pueden incrementar el pH en las capas más profundas. El suelo de páramo presentó un pH más bajo (5,76), debido a la producción de materia orgánica ácida, como ácidos húmicos y fúlvicos, que al descomponerse liberan ácidos en el suelo (Oliva Cruz et al., 2016).

Figura 14

pH (30-60) (Usos de suelo)



Nota: La figura representa los valores de pH obtenidos a una profundidad de 30-60 cm en los diferentes usos de suelo.

4.1.7 Test de NaF

Los Andisoles son suelos formados a partir de materiales volcánicos como cenizas, mediante procesos de meteorización en condiciones ácidas y climas húmedos. Estos suelos se caracterizan por tener su fracción coloidal dominada por complejos alúmina-humus o alófana/imogolita (Sánchez & Rubiano, 2015).

Tras analizar todas las muestras de suelo recogidas en la zona de estudio, se obtuvo que a una profundidad de 0-30 cm, del total de muestras un 49% presentó una reacción fuerte, mientras que un 35% tuvo una reacción moderada y un 15% una reacción nula (Figura 15). Dado que el 84% de las muestras presentó alguna reacción, se comprueba la existencia de abundantes arcillas alofánicas y/o complejos órgano/alumínicos en estos suelos, esto demuestra que pertenecen al orden Andisoles.

Figura 15

Test de NaF



Nota: La imagen representa los resultados visuales obtenidos al aplicar el test de Naf en las muestras de suelo.

4.1.8 Carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico proviene de la MO presente en el suelo. Esta es la variable o factor más importante para poder calcular los valores de densidad aparente del suelo que no se conocen, seguido por las cantidades de arcilla y limo que también influyen, aunque en menor medida (Jalabert et al., 2010).

Al evaluar el COS dentro del área de estudio a una profundidad de 0-30 cm, presentó diferencias significativas ($p = 0,000$) entre los ecosistemas analizados. Estas variaciones se atribuyen principalmente a las diferencias climáticas y la tasa de descomposición de la materia orgánica característicos de cada ecosistema. Se pudo determinar que el uso de suelo de páramo tiene la mayor concentración de COS con una media de 3,56 %, seguidos de pastos con una media de 2,77 % y cultivo con una media de 2,61 % (Ver Figura 16).

Un estudio realizado por Hurtado et al., (2023), en la zona de páramo de Sayaro, ubicada en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha, ofrece datos comparables con la presente investigación. En dicho estudio, el porcentaje de COS en páramo natural presentó una media de 2,48%, frente al 3,52% obtenido en este estudio. En la zona de pastoreo, registraron un promedio de 1,74% de COS, mientras que en este estudio se obtuvo un promedio de 2,77%. Para la zona de cultivo, con mayor intervención antropogénica, obtuvieron un valor de 2,94%, en comparación con el 2,61% de este estudio.

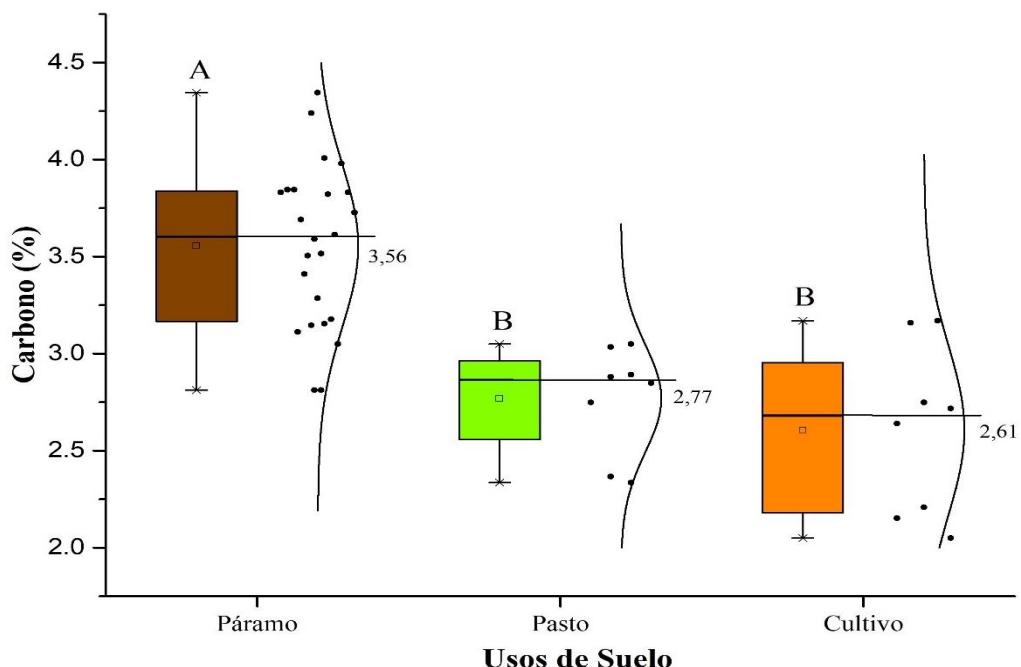
Se observan ligeras variaciones entre los diferentes usos del suelo en ambos estudios. Estas diferencias podrían atribuirse a las condiciones específicas del páramo de Sayaro, que se encuentra a pocos kilómetros del volcán Cayambe y está cubierto parcialmente de nieve. Además, los autores mencionan la presencia de ceniza volcánica, lo que podría explicar la menor cantidad de carbono en el suelo en algunas áreas de su estudio.

Adicionalmente, de acuerdo con el estudio de Llambí et al. (2012) los páramos de reciente formación presentan concentraciones de carbono orgánico en el suelo que oscilan entre el 2 y 10% ($3,5-10 \text{ kg/m}^2$), valores similares a los observados en páramos de condiciones más secas. Por lo tanto, se puede considerar que el páramo del Igualata

corresponde a un ecosistema de páramo joven con porcentaje de carbono menor en comparación con los páramos andinos, considerando que tanto las áreas naturales como las que han sufrido altos niveles de perturbación (cultivo, pasto) exhiben porcentajes de carbono orgánico dentro de dichos rangos.

Figura 16

Carbono orgánico (0-30) cm



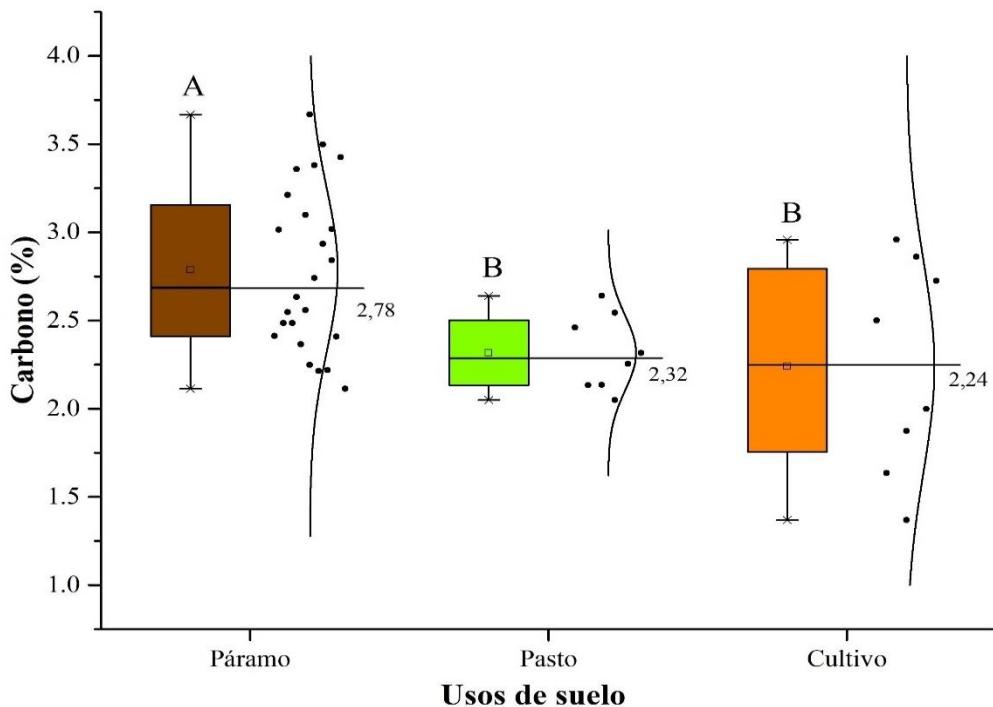
Nota: La figura muestra el porcentaje de carbono orgánico respecto a los diferentes usos de suelo a una profundidad de 0-30 cm.

La Figura 17 muestra los valores obtenidos de COS dentro del área de análisis a una profundidad de 30-60 cm, los mismos presentaron diferencias significativas ($p = 0,006$), esto debido a las variables climáticas como topográficas. El páramo tiene la mayor concentración de COS con una media de 2,78 %, esto se debe a que este tipo de cobertura vegetal autóctona brinda una protección más efectiva a la capa superficial del suelo, lo cual favorece una mayor acumulación y preservación del carbono orgánico dentro del mismo (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017).

En cambio, el cultivo indicó una menor concentración de COS con una media de 2,24%, esto es producto de que este tipo de coberturas vegetales aportan una cantidad inferior de biomasa subterránea al suelo, en comparación con la vegetación nativa del páramo. Adicionalmente, la menor protección que brindan estas coberturas dispersas facilita una mayor exposición del suelo a procesos que aceleran la descomposición de la MO, dificultando así la retención y acumulación de carbono en el mismo (Zimmermann et al., 2010).

Figura 17

Carbono orgánico (30-60) cm



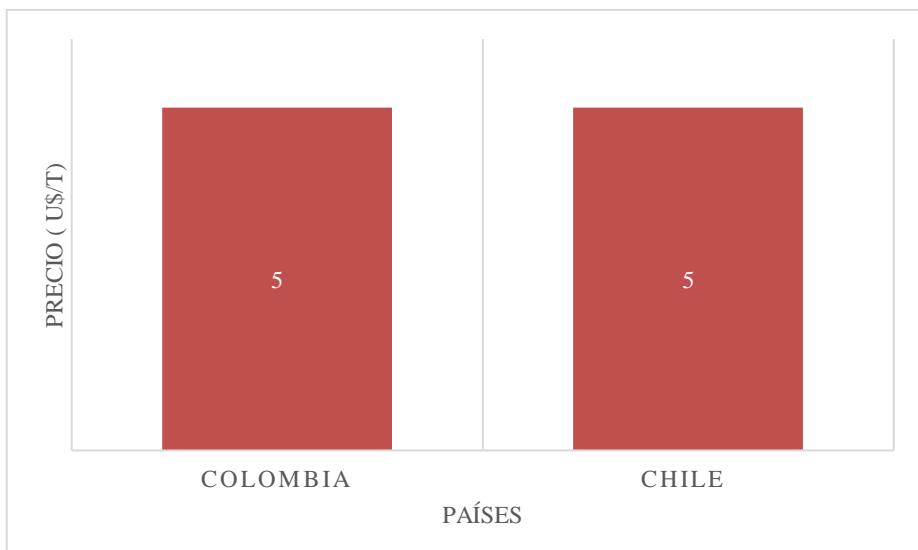
Nota: La figura muestra el porcentaje de carbono orgánico respecto a los diferentes usos de suelo a una profundidad de 30-60 cm.

4.2 CONTENIDO DE CARBONO COMO UN SERVICIO ECOSISTÉMICO QUE OFERTA EL PÁRAMO DEL IGUALATA

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2022) los mercados de carbono son plataformas de intercambio donde se negocian créditos de carbono. Estos sistemas permiten a empresas e individuos mitigar su impacto ambiental al adquirir créditos de organizaciones dedicadas a la reducción o eliminación de gases de efecto invernadero. De esta manera, los participantes pueden compensar sus propias emisiones, contribuyendo así a un equilibrio global en la huella de carbono, es importante destacar que la información disponible sobre los precios en este mercado es limitada. Este estudio considera valores de referencia de países pertenecientes a América Latina y el Caribe (Figura18). La estimación del precio por tonelada de CO₂ se obtuvo de datos del Banco Mundial, estableciéndose en \$5.00/ton/CO₂. Este valor se encuentra dentro del rango de precios observado en los países analizados.

Figura 18

Mercado de Carbono fijado en países de América Latina y el Caribe



Nota: La figura muestra el precio del carbono fijado en los países de América Latina y el Caribe.

La tabla 3, presenta la valoración económica del contenido de carbono, calculado por medio del método de costo de daño evitado a nivel mundial por la mitigación del cambio climático (Castro, 2011). Considerando un costo social de carbono de 5 USD/ha, la quebrada Hualcanga que abarca un área de 562,01 ha y almacena 376 ton CO₂/ha, genera un valor económico de 1,08 millones de dólares americanos. Esta cifra representa el beneficio económico de mantener el carbono en el suelo de la quebrada, en lugar de que sea liberado a la atmósfera y favorezca al cambio climático.

El valor económico más alto corresponde al área de suelo bajo páramo (0,86 millones de dólares americanos), lo que se atribuye a su capacidad de acumular grandes cantidades de carbono, facilitada por las bajas temperaturas que reducen las tasas de descomposición de la materia orgánica (Pinos et al., 2021). En contraste, al comparar el valor económico del carbono tomando como referencia el suelo de páramo (100%), se evidencia una pérdida significativa en los otros usos de suelos. Los destinados a pastos muestran una disminución del 86% en su capacidad de retención de carbono, conservando tan solo el 14% (0,12 millones de dólares) del valor económico en comparación con el páramo. La situación es más crítica en los suelos de cultivo, donde la pérdida alcanza el 88%, reteniendo solamente el 12% (0,10 millones de dólares) del valor económico de carbono. Estas cifras indican la magnitud del impacto negativo que la conversión de páramos a tierras de uso agrícola y ganadero tiene sobre la capacidad de los suelos para almacenar carbono, recalmando la importancia de preservar los ecosistemas de páramo como valiosos sumideros naturales de este elemento (Pinos et al., 2021).

Tabla 33.*Valor económico de CO de los diferentes usos de suelo.*

Usos de Suelo	Mg/ha	Área (ha)	% de área	% Carbono orgánico	Carbono (tonCO ₂ /ha)	Precio en millones/ton CO ₂ / ha	\$ Total
Páramo	105,92	444,87	79,16	3,52	391	0,86	
Pasto	100,52	64,57	11,49	2,77	368	0,12	1,08
Cultivo	102,57	52,57	9,35	2,60	371	0,10	
						376	
						376	

Cunalata et al. (2013) señala en su estudio que la degradación de los suelos de páramo podría liberar el carbono almacenado, incrementando los niveles de CO₂ en la atmósfera y exacerbando la crisis climática. Frente a esta situación, resulta crucial evidenciar el valor económico de la captura de carbono, pues esto permite desarrollar estrategias de conservación basadas en su potencial como medida efectiva de mitigación del cambio climático. Esta perspectiva se alinea con el quinto informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2014), que destaca la valoración económica del almacenamiento de carbono como una de las estrategias más eficientes en términos de costo-beneficio para preservar las reservas de carbono presentes en los suelos.

Pinos et al. (2021), proporciona datos relevantes sobre los suelos del páramo cercano al Bosque Protector Cubilán. En su estudio, estimaron un costo de 10 dólares por tonelada de CO₂, con un contenido de carbono de 392,3 ton CO₂/ha en un área de 757,83 ha, lo que resultó en un valor económico de 2,97 millones de dólares estadounidenses. Por el contrario, el presente estudio considera un escenario de costo más bajo, utilizando un valor de 5 dólares por tonelada de CO₂. El área del páramo en la quebrada Hualcanga es de 444,87 ha, esta presenta 391 ton CO₂/ha con un precio estimado de 0,86 millones de dólares estadounidenses. Estas diferencias nos muestran la importancia de considerar múltiples escenarios al valorar económico los servicios ecosistémicos de los páramos, lo que permite una toma de decisiones más informada en cuanto a su conservación y manejo.

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La transformación del ecosistema de páramo, al sustituir su vegetación natural por tierras de cultivo y pasto, ha provocado diversas alteraciones en el suelo. Estas incluyen una reducción en el contenido de carbono y un incremento en la densidad

aparente. Estos cambios, se han vuelto evidentes con el paso del tiempo y han contribuido al deterioro de la calidad del suelo en estas zonas.

- El uso del suelo tiene un impacto significativo en el contenido de CO₂. Los ecosistemas naturales como el páramo muestran niveles más altos en comparación con áreas destinadas a pasto y cultivo. Esta tendencia se mantiene a diferentes profundidades, aunque con una disminución general en los niveles de carbono orgánico a mayor profundidad. Estos hallazgos resaltan la importancia de las prácticas de manejo del suelo y la conservación de ecosistemas naturales para mantener y mejorar los niveles de carbono orgánico, lo cual es crucial para la salud del suelo y la mitigación del cambio climático.
- El análisis del valor económico del almacenamiento de carbono en la quebrada Hualcanga revela el alto potencial del páramo como sumidero de CO₂. Con un valor de mercado de 1,08 millones de dólares, la conservación de este ecosistema ofrece beneficios tanto ecológicos como para las comunidades locales en ámbitos como la agricultura y ganadería. Sin embargo, a pesar de su importancia y vulnerabilidad, los páramos están siendo severamente afectados por el avance de la frontera agrícola y el pastoreo, junto con otras actividades como la quema de pastizales. Por ello, es importante implementar estrategias de manejo sostenible que equilibren las necesidades humanas con la conservación de estos ecosistemas, que son esenciales para el bienestar ambiental y socioeconómico de las regiones que dependen de ellos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios más amplios sobre el contenido de carbono en el suelo, debido a la limitada información disponible. Esta investigación permitirá implementar medidas para minimizar los impactos ambientales y evaluar con precisión el estado actual del uso del suelo.
- Conservar las zonas dentro del ecosistema páramo, puesto que como se evidencio estas áreas son grandes depósitos de carbono que contribuyen a la mitigación del calentamiento global.
- Difundir los resultados de la investigación entre las autoridades y los habitantes de las zonas de páramo, con el fin de que comprendan los valiosos servicios ecosistémicos que proporciona este recurso. La finalidad de esta iniciativa es incrementar la conciencia ambiental y fomentar una cultura de conservación de estos ecosistemas frágiles.

6. BIBLIOGRÁFIA

- Atuk. (2021, 23 de Junio). El estallido científico en los páramos. ATUK. <https://atuk.com.ec/blog/ciencia-paramos/>
- Ayala, L., Villa, M., & Aguirre Mendoza, Z. (2014). Quantification of carbon in the moors of the Yacuri National Park, provinces of Loja and Zamora Chinchipe, Ecuador. In CEDAMAZ 2014 · (Vol. 4, Issue 1).
- Balmaseda, C., & Ponce De León, D. (2019). Características de los suelos del centro de producción y prácticas Río Verde, Santa Elena, Ecuador. Revista Ciencia e Investigación, 4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3279873>
- Camacho, J., Forero, N., Ramírez, L., & Rubiano, Y. (2017). Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. Colombia Forestal, 20(1), 5–18. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01>
- Cargua, F., Rodríguez, M., Carrión, D., Recalde, G., & Santillán, P. (2017). Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park-Ecuador. Acta Agronomica, 66(3), 408–413. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.52467>
- Carrasco, M., & Padilla, A. (2015). Propuesta de conservación del páramo de la comunidad Pichán central, parroquia San Isidro, cantón Guano.
- Castañeda, A. E., & Montes, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. Entramado, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Castro, M. (2011). Proyecto “Creación de Capacidades para la Valoración Socioeconómica de los humedales altoandinos.” EcoCiencia. https://ecocciencia.org/wp-content/uploads/2022/02/una_valoracion_economica_en_bofedales_del_paramo.pdf
- Chambers, F., & Beilman, D. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. Mires and Peat, 7(September 2016), 1–10.
- Chuncho Morocho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. <https://www.researchgate.net/publication/344180955>
- Ciancaglini, N. (1990). Suelos de la familia gruesa o livianos. In Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico (pp. 1–10).
- Cremona, V., & Enríquez, A. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. EEA Bariloche. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/7709>
- Cunalata, C., Inga, C., Alvarez, G., Recalde, C., & Echeverría, M. (2013). Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades de Chimborazo y Shobol Llinllin en Ecuador. Boletín Del Grupo Español Carbón, 27, 10–13.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2019). El suelo, la tierra y el cambio climático.
- FAO. (1998). Estructura del suelo. FAO. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s!.54026!x6706s07.htm

- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación, 100.
- FAO. (2019). Textura del suelo. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- FAO. (2022). Servicios culturales.
- FAO. (2023, 15 de Febrero). FAO publica su primera evaluación mundial del carbono en el suelo de los pastizales. <https://lawebdelasalud.com/fao-publica-su-primera-evaluacion-mundial-del-carbono-en-el-suelo-de-los-pastizales/>
- Fernández, C., Cely, G., & Serrano, P. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28(1), 121–133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
- Ferrari, M., & Salvador, D. (2021). El Fondo de Páramos y Lucha contra la Pobreza promueve la implementación de Planes de Manejo participativos, cultural y económicamente sostenibles en la Provincia de Tungurahua, Ecuador. https://www.euroclima.org/media/attachments/2021/04/30/pra_solucion_acra_gobernanzaterritorial.pdf
- García, V. J., Márquez, C. O., Isenhart, T. M., Rodríguez, M., Crespo, S. D., & Cifuentes, A. G. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Helioyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- Glez, F. (2023, 9 de Enero). La importancia del carbono en el suelo. <https://evenor-tech.com/la-importancia-del-carbono-en-el-suelo/#:~:text=La%20cantidad%20de%20carbono%20del,suelo%20y%20la%20erosi%C3%B3n>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los páramos andinos ¿Qué Sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. <http://www.uicn.org/sur>
- Hurtado, M. A., Alulema, R. A., & Palacios, T. A. (2023). Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 16(2), 79–92. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4323>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. In IPCC (p. 157). <http://www.ipcc.ch>.
- Jalabert, S. S. M., Martin, M. P., Renaud, J. P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., & Arrouays, D. (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management*, 26(4), 516–528. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x>
- Kluepfel, M., & Lippert, B. (2016). Cambiando el pH del suelo. <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>
- León, J. E., Oré, L. E., Vertiz, J. J., Mendez, G. S., Mercado, C. E., Garcia, G., & Diaz, J. R. (2022). Geohelminths and physicochemical parameters of the soil as indicators of environmental quality in José Crespo y Castillo, Huánuco district. *Boletín de*

- Malariologia y Salud Ambiental, 62(3), 383–396.
<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.623.004>
- Llambí, L., Becerra, M., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., & Días, L. (2019). Monitoreo de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos en los Ecosistemas Altoandinos de Colombia: Hacia una Estrategia Integrada. Bione Digital Library. <https://bioone.org/journals/mountain-research-and-development/volume-39/issue-3/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1/Monitoring-Biodiversity-and-Ecosystem-Services-in-Colombias-High-Andean-Ecosystems/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1.full>
- Llambí, L., Soto, A., Céller, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo.
- Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). Los suelos del páramo. Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador. Abya Yala.
- Minitab, Ll. (2020). Introducción a Minitab Statistical Software. 63.
- Muñoz, M., Delgado, M., & Lucas, M. (2021). Soil biodiversity and organic carbon are essential to reverse desertification. In Ecosistemas (Vol. 30, Issue 3). Asociacion Espanola de Ecología Terrestre. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
- Oliva Cruz, M., Collazos Silva, R., & Aldin Esparraga Espinoza, T. (2016). Efecto de las plantaciones de *Pinus patula* sobre las características fisicoquímicas de los suelos en áreas. <https://doi.org/10.25127/indes.201401.003>
- Pinos, D., Morales, O., & Durán, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. Revista de Ciencias Ambientales, 55(2), 157–179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>
- Porta, J., López, M., & Poch, R. M. (2019). Edafología: uso y protección de suelos (3era ed.). <https://books.google.com.ec/books?id=7x1fAwAAQBAJ&pg=PA556&lpg=PA556&dq=un+ma#v=onepage&q=un%20ma&f=false>
- Prat, C. (2019). Elementos técnicos para la gira de redes en Ecuador. https://www.redsuelosvolcanicos.com/wp-content/uploads/2020/02/9_Gira-suelos-Red-ecuador-15-11-2019-Chile.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2022, 27 de Mayo). ¿Qué son los mercados de carbono y por qué son importantes? Publicaciones Del Blog.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céller, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. Suelos Ecuatoriales, 42(2), 138–153.
- Quijano, L., Vega, W., Atencia, J., & Torres, K. (2022). La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de *Megathyrsus maximus*. Acta Agronomica, 70(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.88785>

- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. 4. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1829/2639>
- Rojas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- Rosero, C. (2016). “Estudio de vulnerabilidad a nivel de ecosistema de Páramo frente al Cambio Climático en la zona de Pichán Comunidad Igualata Parroquia San Isidro, Cantón Guano Provincia de Chimborazo.” Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Rubio, A. M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales.
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. www.cenicafe.org
- Sánchez, J. A., & Rubiano, Y. (2015). Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. EIA, 12, 1–13. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.11.E2.85-97>
- Sosa, D. A. (2012). Guía Manejo de suelos. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos (en línea). Centro Regional Misiones, Argentina. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp>
- Soto, P. (2013). Evaluación de la sensibilidad del parámetro pH en NaF en distintas concentraciones para diferenciar suelos volcánicos bajo un manejo similar. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/fas718e/doc/fas718e.pdf>
- Vallejo, L., & Calvache, M. (2005). Cuantificación de la retención de agua del suelo bajo diferentes estados de vegetación del páramo, sub-cuenca del río la Chimba, Cayambe, Pichincha. <https://www.researchgate.net/publication/303520379>
- Yaguache, L. (2022). Humedad y almacenamiento de agua en el suelo en cuatro tipos de cobertura vegetal. Ciencias Agrarias / Agricultural Sciences.
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D. H., Bush, M. B., Feeley, K. J., Garcia, K. C., Dargie, G. C., Farfan, W. R., Goetz, B. P., Johnson, W. T., Kline, K. M., Modi, A. T., Rurau, N. M. Q., Staudt, B. T., & Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. Ecosystems, 13(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>
- Zúñiga, F., Huertas, J., Guerrero, G., Sarasty, J., Dörner, J., & Orjuela, H. B. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. In Terra Latinoamericana (Vol. 36, Issue 2, pp. 183–196). Mexican Society of Soil Science. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363>

7. ANEXOS



Fotografía 1

Recolección de muestras de suelo



Fotografía 2.

Recolección de muestras de suelo



Fotografía 3

Recolección de muestras de suelo



Fotografía 4

Recolección de muestras de Dap



Fotografía 5

Identificación de color en el suelo húmedo



Fotografía 7

Análisis de pH



Fotografía 6

Identificación de color en el suelo seco



Fotografía 8

Análisis de conductividad eléctrica



Fotografía 9

Análisis de CO



Fotografía 10

Análisis de CO



Fotografía 11

Determinación de la textura



Fotografía 12

Test Naf