



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

Valoración ecosistémica mediante la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del Río Coco, cantón Pallatanga.

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniera Ambiental**

**Autor:**

Martínez Zúñiga, Grace Yesenia

**Tutor:**

Ing. Santillán Lima, Guido Patricio MSc

**Riobamba, Ecuador. 2025**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Grace Yesenia Martínez Zúñiga**, con cédula de ciudadanía **172807639-7**, autora del trabajo de investigación titulado: **Valoración ecosistémica mediante la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del Río Coco, cantón Pallatanga**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo 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 cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los dos días del mes de junio de 2025.



Grace Yesenia Martínez Zúñiga

C.I: 172807639-7

## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Guido Patricio Santillán Lima** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado, **Valoración ecosistémica mediante la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del Río Coco, cantón Pallatanga** bajo la autoría de **Grace Yesenia Martínez Zúñiga**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, al día uno del mes de mayo de 2025.



---

Ing. Guido Patricio Santillán Lima MSc.

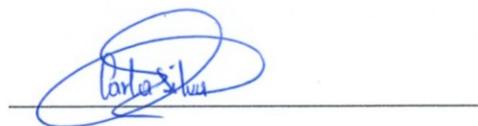
C.I: 0602780777

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “Valoración ecosistémica mediante la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del río coco, cantón Pallatanga”, presentado por Grace Yesenia Martínez Zúñiga, con cédula de identidad 172807639-7, bajo la tutoría de Ing. Patricio Santillán Lima; 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 a los dos días del mes de Junio de 2025.

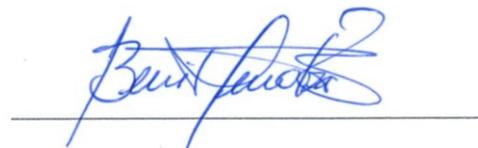
Ing. Carla Silva Padilla MgS.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Dra. Anita Ríos Rivera PhD.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Ing. Benito Mendoza Trujillo PhD.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**





# CERTIFICACIÓN

Que, **MARTÍNEZ ZÚÑIGA GRACE YESENIA** con CC: **1728076397**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“Valoración ecosistémica mediante la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del Río Coco, cantón Pallatanga”**, cumple con el **4 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Compilatio**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de mayo de 2025



Firma digitalizada por:  
**GUIDO PATRICIO  
SANTILLAN LIMA**  
Código de verificación con QR Code

Ing. Guido Patricio Santillán Lima MSc.  
**TUTOR(A)**

## DEDICATORIA

A Dios, por ser mi luz en los momentos de oscuridad, por fortalecer mi espíritu cuando las fuerzas flaqueaban y por recordarme cada día que, con fe, todo es posible.

A mis padres, Manuel Martínez y Cecilia Zúñiga, pilares fundamentales en mi vida, por su amor incondicional, por cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada sacrificio que hicieron para que yo pudiera llegar hasta aquí. Gracias por enseñarme, con el ejemplo, el valor del trabajo duro, la humildad y la constancia.

A mi hermano David. Gracias por estar ahí, a tu manera, celebrando mis avances.

A mi pequeña hermanita María Victoria, por su risa contagiosa, sus abrazos espontáneos y esa forma tan especial que tiene de hacer que todo parezca más bonito. Gracias por ser un rayo de luz incluso en mis días más grises.

A Neiser, por su compañía incondicional, por estar presente en los días buenos y en los difíciles, por su paciencia, su apoyo y por hacer este camino más llevadero y significativo. Me alegra compartir este logro contigo.

A mi amado Jack, que, aunque ya no está físicamente conmigo, sigue presente en mi corazón. Gracias por acompañarme en tantas noches largas de estudio y tu silenciosa compañía. Te fuiste en el camino, pero tu recuerdo me siguió hasta el final. Esta tesis también es para ti.

Y a Baggy, mi compañero felino de los últimos meses, que llegó cuando menos lo esperaba, con su ternura, sus ronroneos y su presencia justo cuando más lo necesitaba. Te fuiste pronto, pero te quedas conmigo para siempre.

*Grace Yesenia Martínez Zúñiga*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi profunda gratitud a Dios, fuente de inspiración y guía constante en cada paso.

A mis pilares, mis amados padres, gracias por creer siempre en mí, por su amor incondicional y por cada sacrificio que hicieron para que yo pudiera alcanzar mis metas.

Un agradecimiento especial a mis tíos, Patricio e Inés, y a mis primos, quienes me abrieron las puertas de su hogar y me brindaron un ambiente familiar invaluable durante este proceso.

A mi amigo Jefferson, compañero desde los inicios de esta carrera, cuya amistad y apoyo continuo han sido un pilar fundamental en mi camino.

Y, finalmente, a Neiser, por estar presente en cada etapa de este proceso. Gracias por tu apoyo, tu cariño genuino y por compartir conmigo tantos momentos de esfuerzo y logro. Tu compañía marcó una diferencia invaluable.

A todos ustedes, ¡gracias de corazón!

*Grace Yesenia Martínez Zúñiga*

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ECUACIONES	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2    JUSTIFICACIÓN .....	18
1.3    OBJETIVOS.....	19
1.3.1    General.....	19
1.3.2    Específicos .....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1    MARCO REFERENCIAL .....	20
2.2    MARCO CONCEPTUAL.....	21
2.2.1    Sistemas de Información Geográfica .....	21
2.2.2    Landsat 7.....	21
2.2.3    Análisis multitemporal .....	22
2.2.4    Clasificación supervisada .....	22
2.2.5    NDVI ( Normalized Difference Vegetation Index) .....	22
2.2.6    NDWI (Normalized Difference Water Index).....	23
2.2.7    NBR (Normalized Burn Ratio) .....	23
2.2.8    Random Forest.....	24
2.2.9    Coeficiente Kappa .....	24
2.2.10    Calidad de suelo.....	25

2.2.11	Páramo .....	26
2.2.12	Características físicas del suelo .....	26
2.2.13	Características químicas del suelo .....	26
2.2.14	Servicios ecosistémicos.....	28
2.2.15	Carbono Orgánico.....	28
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA. ....		29
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	29
3.2	METODOLOGÍA.....	29
3.2.1	Localización del área de estudio .....	29
3.2.2	Identificación de los cambios de uso de suelo .....	32
3.2.3	Determinación de características físicas y químicas del suelo .....	41
3.2.4	Establecimiento de puntos de muestro .....	41
3.2.5	Recolección de las muestras .....	43
3.2.6	Caracterización del Suelo .....	43
3.2.7	Determinación de porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS).....	47
3.2.8	Valoración económica del contenido de carbono en el suelo .....	48
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		49
4.1	RESULTADOS .....	49
4.2	DISCUSIÓN.....	89
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		94
5.1	CONCLUSIONES .....	94
BIBLIOGRAFÍA .....		96
ANEXOS.....		101

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1</b>	Valoración del Coeficiente Kappa .....	25
<b>Tabla 2</b>	Categorías de cobertura y Uso de la Tierra.....	36
<b>Tabla 3</b>	Superficie de Páramo y número de muestras.....	43
<b>Tabla 4</b>	Superficie de Cultivo y número de muestras.....	43
<b>Tabla 5</b>	Matriz de confusión y Kappa 2004 .....	60
<b>Tabla 6</b>	Matriz de confusión y Kappa 2014 .....	61
<b>Tabla 7</b>	Matriz de confusión y Kappa 2024 .....	61
<b>Tabla 8</b>	Tendencias multitemporales del suelo.....	70
<b>Tabla 9</b>	Valores de pH correspondientes a la formación Alausí en Páramo.....	71
<b>Tabla 10</b>	Valores de conductividad eléctrica correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo .....	72
<b>Tabla 11</b>	Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo.....	73
<b>Tabla 12</b>	Valores de Humedad correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo .....	75
<b>Tabla 13</b>	Valores de Carbono Orgánico correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo.....	77
<b>Tabla 14</b>	Valores de pH correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo.....	78
<b>Tabla 15</b>	Valores de Conductividad correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo.....	78
<b>Tabla 16</b>	Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo.....	79
<b>Tabla 17</b>	Valores de Humedad correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo .....	80
<b>Tabla 18</b>	Tipo de suelo y textura correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo.....	80
<b>Tabla 19</b>	Valores de Carbono correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo .....	81
<b>Tabla 20</b>	Valores de pH correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo.....	82
<b>Tabla 21</b>	Valores de Conductividad correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo .....	82

<b>Tabla 22</b> Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo .....	83
<b>Tabla 23</b> Valores de Humedad correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo.....	84
<b>Tabla 24</b> Tipo de Suelo, Textura y Color correspondientes a la zona baja de Cultivo.....	84
<b>Tabla 25</b> Valores de Carbono Orgánico correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo .....	85
<b>Tabla 26</b> Valor económico de CO de las diferentes formaciones geológicas .....	88
<b>Tabla 27</b> Valor económico de CO correspondiente a Páramo.....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Mapa de ubicación de la Microcuenca del Río Coco.....	30
<b>Figura 2</b>	Mapa de usos de suelo de la Microcuenca del Río Coco. ....	31
<b>Figura 3</b>	Mapa de ubicación de puntos de muestreo. ....	42
<b>Figura 4</b>	Análisis de Color de Suelo con la Tabla Munsell.....	44
<b>Figura 5</b>	Determinación de la Textura del Suelo por el Método de sensibilidad del tacto (organoléptico) y prueba de manipulación.....	45
<b>Figura 6</b>	Imagen satelital año 2004 de la microcuenca del Río Coco.....	50
<b>Figura 7</b>	Imagen satelital representativa del año 2014 de la microcuenca del Río Coco. ....	52
<b>Figura 8</b>	Imagen satelital representativa del año 2024 de la microcuenca del Río Coco. ....	54
<b>Figura 9</b>	Mapa Multitemporal de Uso de Suelo Año 2004 .....	64
<b>Figura 10</b>	Mapa Multitemporal de Uso de Suelo Año 2014 .....	65
<b>Figura 11</b>	Mapa Multitemporal de Uso de Suelo Año 2024.....	67
<b>Figura 12</b>	Mapas Comparativos Multitemporales de los años 2004, 2014, 2024 .....	69
<b>Figura 13</b>	Análisis de la textura del Suelo por el Método de sensibilidad del tacto (organoléptico) y prueba de manipulación.....	76
<b>Figura 14</b>	Porcentaje de Carbono Orgánico en la Microcuenca del Río Coco.....	86

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada .....	22
<b>Ecuación 2</b> Cálculo del NDVI para Landsat 7 (año 2004).....	23
<b>Ecuación 3</b> Cálculo del NDVI para Copernicus (año 2014 y 2024).....	23
<b>Ecuación 4</b> Ecuación para calcular el índice Normalized Burn Ratio .....	24
<b>Ecuación 5</b> Fórmula para calcular el coeficiente K .....	25
<b>Ecuación 6</b> Determinación del tamaño de la muestra .....	41
<b>Ecuación 7</b> Porcentaje de humedad del suelo.....	46
<b>Ecuación 8</b> Fórmula para calcular la densidad aparente .....	47
<b>Ecuación 9</b> Fórmula para calcular el porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS) .	47
<b>Ecuación 10</b> Cálculo del porcentaje de materia orgánica.....	47
<b>Ecuación 11</b> Contenido de C del suelo.....	48
<b>Ecuación 12</b> Fórmula para determinar la valoración económica del contenido de carbono .....	48

## RESUMEN

Este estudio evalúa la valoración ecosistémica del carbono orgánico en los suelos del páramo de la microcuenca del río Coco, en Pallatanga, provincia de Chimborazo. Se analizó el impacto del cambio de uso de suelo en la captura de carbono entre 2004, 2014 y 2024, mediante imágenes satelitales (Landsat 7 y Sentinel-2), clasificación con Random Forest en Google Earth Engine y procesamiento espacial en ArcGIS. Se identificaron transformaciones en la cobertura terrestre y se estimó el contenido de carbono según las formaciones geológicas presentes.

Los resultados indican una expansión agropecuaria y pérdida de cobertura de páramo, especialmente entre 2014 y 2024. Se identificaron procesos de fragmentación ecológica, avance de la frontera agrícola y pérdida de vegetación nativa. Las formaciones Alausí y Piñón mostraron la mayor capacidad de almacenamiento de carbono, a diferencia de los suelos agrícolas que presentaron una disminución. El valor económico estimado del carbono almacenado en el páramo fue de aproximadamente 6,92 millones de dólares, según mercados voluntarios internacionales.

Estos hallazgos destacan la importancia de conservar los ecosistemas de páramo como sumideros de carbono y motivan la implementación de políticas de manejo sostenible y restauración ecológica, que integren a las comunidades locales en la conservación y contribuyan a mitigar el cambio climático.

**Palabras claves:** sumideros de carbono, degradación del suelo, clasificación multitemporal, Google Earth Engine, Random Forest.

## Abstract

This research assesses the ecosystem valorization of organic carbon in paramo soils of Coco River micro-watershed, in Pallatanga, Chimborazo province. The impact of land use change on carbon capturing was analyzed between 2004, 2014 and 2024, using satellite images (Landsat 7 and Sentinel-2), classification with Random Forest in Google Earth Engine and spatial processing in ArcGIS. Land cover transformations were identified and carbon content was estimated according to the present geological formations. The results reveal agricultural expansion and loss of paramo cover, especially between 2014 and 2024. There were identified processes of ecological fragmentation, advancement of the agricultural border, and loss of native vegetation. Alausí and Piñón formations had the highest carbon storage capacity, in contrast to agricultural soils, which presented a decrease. The estimated economic value of carbon stored in the paramo was around US\$6.92 million, according to international voluntary markets.

These results emphasize the importance of conserving paramo ecosystems as carbon sinks and motivate the implementation of sustainable management and ecological restoration policies that integrate local communities in conservation and contribute to mitigating climate change.

### Keywords:

CARBON SINKS, LAND DEGRADATION, MULTITEMPORAL CLASSIFICATION, GOOGLE EARTH ENGINE, RANDOM FOREST.



Reviewed by  
Msc. ENRIQUE GUAMBO YEROVI  
ENGLISH PROFESSOR  
C.C. 0601802424

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Se conoce que los suelos son fuentes importantes de carbono orgánico (CO) cuando hablamos de reservorios en ecosistemas terrestres. No obstante, las necesidades humanas, como la producción de alimentos, energía y fibra, han provocado el uso continuo e intenso del mismo, esto conlleva a que se vea amenazado debido al cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan dichas actividades, es importante mencionar que el cambio en el uso de suelo, como la transformación de páramo a zona de intervención, influye significativamente en la captura y almacenamiento de carbono (C) (Valencia E et al., 2017).

La captura de carbono es un beneficio ecológico esencial para la salud humana, lo que significa que el cambio de carbono en el aire en carbono orgánico se mantiene en el suelo y las plantas. En los páramos esta materia orgánica puede alcanzar hasta 60 kg/c/m<sup>2</sup>, ubicándolos así entre los suelos con la reserva de carbono más alta del mundo.

En Sudamérica los páramos abarcan una superficie de 3.576,798 ha, de la cual Ecuador posee el 51% que corresponde a 1.833,834 ha, en el país los páramos cubren un 5% del territorio nacional, convirtiéndose así en el país que tiene la mayor superficie de páramo con respecto a su extensión total (García et al., 2019). Este ecosistema es uno de los más diversos biológicamente, por lo cual ofertan varios servicios. De acuerdo con (Hofstede et al., 2023), la provincia de Chimborazo destaca por poseer un 12.91% de extensión total del ecosistema páramo y el 29,85% de esta se encuentra en Pallatanga. El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Pallatanga, (2021), menciona que este ecosistema cuenta con un nivel de conservación media, ya que estas áreas están destinadas a la producción agropecuaria y por ende sufren intervenciones.

Por consiguiente, este proyecto de investigación se enfoca en la valoración de bienes y servicios ecosistémicos en el páramo de la microcuenca del Río Coco, con el propósito de comprender mejor la dinámica del carbono almacenado en los usos de suelo páramo y cultivo. En búsqueda de responder a las necesidades de estas comunidades las cuales están dentro de las prioridades del Convenio Marco de Cooperación para Fortalecimiento de Capacidades a Comunidades en Situación de Vulnerabilidad, entre la Fundación Visión Mundial Ecuador y Universidad Nacional de Chimborazo.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El contenido de carbono orgánico total (COT) presente en la materia orgánica ha sufrido alteraciones a causa de las prácticas de manejo y uso de suelo, lo que ha provocado dificultades al momento de identificar su cambio, debido a que su producción es lenta y al ser significativamente pequeños en relación con el amplio contenido de COT presente en el suelo proporcionan servicios ecosistémicos, los cuales son funciones naturales que pueden ser utilizados para el beneficio de los seres humanos. La importancia de los servicios ecosistémicos para el bienestar humano ha cobrado relevancia en los últimos años, aunque su cuantificación sigue siendo un desafío (López et al., 2005).

En la actualidad la sostenibilidad global y la calidad de vida de la población se ha visto comprometida debido a los cambios significativos e importantes que se están produciendo sobre la cobertura del suelo (Melgarejo et al., 2022). Ante estos impactos, se ha intensificado la investigación a escala global, regional y local, resaltando el papel fundamental del suelo y sus usos en el contexto ambiental y climático (Pinos et al., 2021).

La valoración de bienes y servicios ecosistémicos a través de la cuantificación de carbono orgánico en el páramo se sitúa en el campo de las ciencias ambientales, por su interdisciplinariedad ya que integran conocimientos de diversas disciplinas como biología, ecología, geología, química, física y economía para entender los procesos naturales y su interacción con las actividades humanas. Las investigaciones en esta área comenzaron a finales de los años 90 y principios de los 2000, motivadas principalmente por la preocupación sobre la deforestación y el deterioro de los páramos, además de la necesidad de comprender su importancia ecológica y económica. Este desafío es evidente en Ecuador, donde dos tercios de los páramos, alrededor de 1,5 millones de hectáreas, no están incluidos en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Farley et al., 2011).

El contenido de carbono en suelos utilizados para la agricultura suele ser bajo debido a los procesos de degradación del suelo y las prácticas de manejo no sostenibles. La erosión es un factor clave que afecta el contenido de carbono, ya que destruye la estructura del suelo, lo que facilita la liberación de carbono en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Además, la labranza intensiva, el uso excesivo de fertilizantes químicos y la deforestación contribuyen a la pérdida de materia orgánica en el suelo, disminuyendo aún más los niveles de carbono. Estas prácticas no solo afectan la capacidad del suelo para almacenar carbono, sino también su fertilidad y capacidad para retener agua, agravando la degradación (Pinos-Morocho et al.,

2021). Por tanto, se han mejorado varias técnicas para distinguir la parte sensible del carbono en el suelo.

Los páramos desempeñan un papel crucial en el ciclo del carbono debido a su capacidad para almacenar grandes cantidades de este elemento. Estos ecosistemas de alta montaña, caracterizados por un clima frío y húmedo, poseen suelos ricos en materia orgánica, ya que el análisis de plantas y otros organismos ocurre de manera muy lenta. Este proceso permite que el carbono se acumule en el suelo, convirtiendo a lento los páramos en importantes sumideros de carbono, donde se retiene más carbono del que se libera (Ayala et al., 2014).

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Existe un componente vital en la biosfera: el suelo. Este recurso es esencial para la vida y la civilización, ya que proporciona diversos servicios ecosistémicos y ambientales. A menudo, pasa desapercibido en la sociedad y su valor rara vez se reconoce adecuadamente. Incluso en el ámbito agrario, su importancia suele ser subestimada. A nivel económico, se considera un recurso, pero su verdadero impacto rara vez se dimensiona correctamente. Hernán Orjuela, (2010), menciona que es esencial reconocer la importancia del suelo para abordar la crisis ambiental.

A nivel internacional, la valoración de servicios ecosistémicos es reconocida como una herramienta esencial para la toma de decisiones en proyectos encaminados a soluciones basadas en la protección del suelo (EUROCLIMA, 2022). En América Latina, se han identificado dimensiones y enfoques de valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas, aunque aún falta un vínculo formal entre ciencias como la agroecología y la economía ecológica para la valoración en páramos (Melgarejo et al., 2022).

El cambio en el uso de suelo, como la transformación de páramo a zona de intervención, influye significativamente en la captura y almacenamiento de carbono, y aunque se sabe que la intervención reduce la cantidad de carbono almacenado, los mecanismos exactos y la magnitud de este impacto requieren una comprensión más detallada (Valencia E et al., 2017). Además, la interacción entre el almacenamiento de carbono y otros servicios ecosistémicos del páramo, como la regulación hídrica y la biodiversidad, no está completamente documentada, lo cual es crucial para una valoración integral de los servicios ecosistémicos que ofrece el páramo.

El estudio proporciona información clave para la conservación de los páramos, permitiendo evaluar su estado de salud y su capacidad para seguir reteniendo carbono a largo plazo. Este conocimiento es esencial para diseñar políticas de manejo sostenible que eviten la degradación de estos ecosistemas, asegurando que sigan cumpliendo su papel en la captura de carbono.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 General**

Valorar los bienes y servicios ecosistémicos a través de la cuantificación de carbono orgánico en el páramo de la microcuenca del río Coco, Pallatanga, Chimborazo, con el fin de contribuir a la conservación de este ecosistema y promover su manejo sostenible.

#### **1.3.2 Específicos**

- Identificar los cambios de uso de suelo bajo páramo y cultivo responsables del avance de la frontera agrícola en el páramo de la microcuenca del río Coco, para estudiar su conservación.
- Determinar las características físicas y químicas del suelo del ecosistema páramo.
- Estimar el valor económico del carbono orgánico como servicio ecosistémico que oferta la microcuenca del río Coco.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 MARCO REFERENCIAL

El estudio "Estimación del almacenamiento de carbono en el suelo en una cuenca boscosa utilizando Modelado cuantitativo de suelo-paisaje" por James A. Thompson y Randall K. Kolka se centró en la cuenca de Clemons Fork en el Bosque Robinson, Kentucky, el cual surge de la importancia de comprender y cuantificar la variabilidad del carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas forestales. Utilizando datos del terreno derivados de un DEM, los investigadores desarrollaron modelos para predecir la variabilidad del carbono orgánico del suelo (COS) en función de atributos topográficos. A través de una cuadrícula de puntos de muestra, compararon métodos tradicionales de medición con un enfoque de modelado de suelo-paisaje, encontrando que este último explica hasta el 71% de la variabilidad del COS. Las estimaciones mostraron un almacenamiento total de COS de 82,0 Gg, superior a las estimaciones tradicionales de 44,8 Gg, destacando la eficacia del modelado de suelo-paisaje para capturar la variabilidad del COS en el terreno y su potencial para ser aplicado en paisajes similares (Thompson & Kolka, 2005).

(Ayala et al., 2014) en el estudio denominado "Cuantificación del carbono en los páramos del Parque Nacional Yacuri" realizado en el año 2014 se centra en evaluar la cantidad de carbono almacenado en dos tipos de páramo: arbustivo y herbáceo. Con una metodología que incluye la determinación de los tipos de cobertura vegetal presentes y caracterización de la flora utilizando parcelas temporales de diferentes tamaños. En el páramo arbustivo, el carbono almacenado en biomasa y necromasa es de 159,05 t/C/ha, y en el herbáceo es de 116,18 t/C/ha. Los estudios muestran que, en páramos herbáceos, el suelo puede almacenar 537,06 toneladas de carbono por hectárea hasta una profundidad de 60 cm, y 471,59 t/C/ha para el arbustivo lo que subraya su importancia como sumidero natural. Los resultados obtenidos fueron que los páramos del Parque Nacional Yacuri almacenan cantidades significativas de carbono en biomasa, necromasa y suelo, beneficiados por la diversidad florística y las condiciones climáticas de baja temperatura y alta altitud que favorecen la retención de carbono, haciendo del PNY un destacado proveedor del servicio ambiental de captura de CO<sub>2</sub>.

El estudio "Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro" se llevó a cabo en el Páramo de Sayaro, en el cantón Cayambe,

Ecuador en el año 2023. El objetivo de este trabajo fue determinar la cantidad de carbono orgánico en tres zonas con diferentes niveles de intervención humana (sin intervención, intervención media y alta intervención). En la cual se aplica metodología que incluye análisis en laboratorio por consiguiente tomaron 45 muestras de suelo (15 por zona) para análisis físicoquímicos usando el método de (Allan Walkley, 1947). Los resultados mostraron que las actividades humanas parecen tener un impacto significativo en la capacidad del suelo de páramo para almacenar carbono, con las zonas sin intervención reteniendo más carbono y las zonas con intervención media y alta mostrando una capacidad reducida de almacenamiento, aunque la alta intervención no es tan perjudicial como la intervención media en este caso particular (Hurtado-Naranjo et al., 2023).

## **2.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1 Sistemas de Información Geográfica**

(Santos P., 2020) define a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como plataformas tecnológicas creadas para gestionar y analizar datos geoespaciales, con el objetivo de solucionar problemas vinculados con la base territorial y el entorno, a través de la gestión automatizada de datos, la organización y modelado de información temática y espacial. Ofrecen múltiples usos como la ordenación del territorio, la gestión catastral, la reducción de riesgos naturales, entre otras.

### **2.2.2 Landsat 7**

Landsat 7 es un satélite que la NASA lanzó para observar la Tierra en 1999. Su meta primordial es suministrar imágenes satelitales de alta resolución para la supervisión de recursos naturales, el cambio mundial y usos en cartografía. Este satélite, integrante de la serie Landsat, ha jugado un papel fundamental en el monitoreo de la Tierra durante más de dos décadas, proporcionando datos útiles para la investigación del medio ambiente y la administración de recursos (USGS, 2019).

### **Copernicus**

La misión Copernicus Sentinel-2 consta de dos satélites en órbita polar que están posicionados en la misma órbita heliosincrónica, con una diferencia de fase de 180°. Su objetivo es monitorear los cambios en las condiciones de la superficie terrestre. Los satélites tienen una amplia franja de cobertura (290 km) y un tiempo de revisita prolongado.

Esta capacidad facilitará el monitoreo de los cambios en la superficie terrestre (*Sentinel-2*, 2021).

### 2.2.3 Análisis multitemporal

Los estudios o análisis multitemporales a través de imágenes de satélite, mapas o fotografías aéreas se han convertido en un instrumento de gran valor para el monitoreo y evaluación ambiental de las variaciones en el uso del suelo y la vegetación, ya que facilitan la comparación digital de dos o más imágenes satelitales, determinando los aumentos o reducciones en la cobertura del suelo durante un periodo de tiempo específico en un espacio (Luis et al., 2020)

### 2.2.4 Clasificación supervisada

Para emplear este método, es imprescindible identificar el área a analizar que permite definir en la imagen áreas que simbolizan las diferentes categorías que se buscan discriminar. Estas áreas se denominan *Training fields* (áreas de entrenamiento), y son útiles para el ordenador para que pueda identificar las diversas categorías en el área de estudio (Yébenes et al., 2015). Para confirmar la categorización de las imágenes satelitales, se pueden emplear cartografía base tradicional, datos recogidos en terreno y otros documentos.

### 2.2.5 NDVI ( Normalized Difference Vegetation Index)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador frecuentemente utilizado para medir la densidad y condición de la flora. Este es un indicador numérico que se determina a partir de la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo visible (RED) del espectro electromagnético. Su escala oscila entre -1 y 1, cuando muestra valores cercanos a 1 señala condiciones de vigor superiores de la vegetación, o sea, vegetación compacta y saludable, mientras que valores cercanos a -1 indican áreas sin vegetación como agua o superficies desérticas. Por lo tanto, el NDVI se percibe como un indicador eficaz de la cobertura de la vegetación (Gómez et al., 2024).

Según (Vela-Pelaez et al., 2024) el NDVI resulta del cociente de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia de la banda del rojo (RED) con respecto a la suma de estas dos reflectancias, esto se expresa como:

#### **Ecuación 1**

*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR = Reflectancia en el infrarrojo cercano

RED = Reflectancia en la banda del rojo

El número de bandas a utilizar está en función del sensor (Pinta, 2021), por lo que para imágenes Landsat 7 se utiliza la banda 4 y banda 7 (Ecuación 2), mientras que para Copernicus se usan las bandas 8 y 12 (Ecuación 3), en este sentido, se establecen las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 2**

*Cálculo del NDVI para Landsat 7 (año 2004)*

$$NDVI = \frac{(banda\ 4 - banda\ 7)}{(banda\ 4 + banda\ 7)}$$

**Ecuación 3**

*Cálculo del NDVI para Copernicus (año 2014 y 2024)*

$$NDVI = \frac{(banda\ 4 - banda\ 8)}{(banda\ 4 + banda\ 8)}$$

### 2.2.6 NDWI (Normalized Difference Water Index)

El NDWI utiliza el valor de la banda verde menos la banda del infrarrojo cercano (NIR), dividido por la suma de las dos bandas (McFeeters, 1996), obteniendo como resultado valores positivos de las características del agua; por lo tanto, se resaltan estas características. La superficie de la Tierra posee valores negativos o cero y se suprime o se descarta. No obstante, en las imágenes NDWI frecuentemente se combinan los cuerpos de agua con los ruidos de zonas urbanizadas, debido a las propiedades de reflectancia parecidas en las bandas verdes y NIR, entre el agua y el suelo urbanizado. Este indicador se ve afectado por las variaciones en la cantidad de agua presente en el dosel vegetal, gracias a la reflectancia a 857 nm y 1241 nm. Lo anterior es resultado de las características de absorción del agua líquida, que varía un poco. Los valores menores a 0 están asociados a superficies brillantes sin presencia de agua, mientras que los valores mayores a 0 indican presencia de agua; cuanto más se acerca a 1, el valor mayor es el contenido o presencia de agua.

### 2.2.7 NBR (Normalized Burn Ratio)

El NBR es uno de los índices más empleados, tanto para señalar las zonas afectadas por incendios como para establecer los diferentes grados de gravedad del fuego que ha

afectado a la vegetación. Se fundamenta en las bandas del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y infrarrojo medio (SWIR, por sus siglas en inglés). En este último, el contenido de agua en las plantas, representado por la banda del SWIR, se confirma como un indicador crucial. La fórmula del NBR se manifiesta:

#### **Ecuación 4**

*Ecuación para calcular el índice Normalized Burn Ratio*

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Donde:

NIR = Infrarrojo cercano

SWIR = Infrarrojo medio

El índice facilita la valoración del impacto a través de un estudio multitemporal de imágenes anteriores y posteriores al incendio, al contrastar la variación de cobertura que se observa en cada imagen. Esto simplifica el análisis al identificar tres aspectos de gran relevancia: el instante inicial del fuego, el instante del incendio y el instante subsiguiente a este. Lo anterior conduce a la identificación de focos de fuego en actividad, además de la valoración de las repercusiones provocadas por estos. Índices como el NBR posibilitan el seguimiento de los perjuicios causados por incendios y simplifican la creación de mapas de áreas incendiadas y la toma de decisiones futuras en la administración ambiental de dichas áreas (Valdez-Zavala et al., 2019).

#### **2.2.8 Random Forest**

El algoritmo de Random Forest es un modelo de aprendizaje automático que se presenta como una evolución de los árboles de decisión. Los árboles de decisión categorizan la información de un modelo mediante una serie de segmentaciones binarias, lo que facilita la realización de proyecciones futuras basándose en dicha categorización. Los Random Forests estarán compuestos por una gran cantidad de árboles de decisión, generados mediante el método del bagging o bootstrap aggregating. Este algoritmo optimiza los árboles de decisión, generando un modelo más confiable y exacto previniendo inconvenientes como el overfitting (Schonlau & Zou, 2020).

#### **2.2.9 Coeficiente Kappa**

De acuerdo con el estudio sugerido por (Cohen, 1960), el coeficiente kappa es un marcador que refleja el nivel de concordancia entre distintos observadores y puede ser calculado en tablas de cualquier tamaño, siempre que se encuentren dos observadores en

comparación. El coeficiente kappa tiene un rango de -1 a +1. Cuando se aproxima a +1, señala un elevado nivel de acuerdo entre los observadores.

Por otro lado, si se aproxima a -1, evidencia un elevado nivel de discrepancia entre los observadores. Un valor de  $\kappa = 0$  señala que la concordancia detectada es la que se anticiparía de manera aleatoria. El coeficiente K es simplemente la proporción de desacuerdos anticipados al azar que no suceden, o en otras palabras, es la proporción de acuerdos tras la eliminación del acuerdo aleatorio de la consideración, y se determina mediante la siguiente fórmula:

**Ecuación 5**

*Fórmula para calcular el coeficiente K*

$$k = \frac{po - pe}{1 - pe}$$

Donde:

K= coeficiente Kappa;

*po* = la proporción de concordancia observada en las que los jueces;

*pe* = la proporción de concordancia que se espera al azar;

$1 - pe$  = grado de acuerdo entre los jueces debido al azar (Cohen, 1960).

**Tabla 1**

*Valoración del Coeficiente Kappa*

Coeficiente Kappa	Nivel de concordancia
0.81 – 1.00	Casi perfecta
0.61 – 0.80	Considerable
0.41 – 0.60	Moderada
0.21 – 0.40	Aceptable
0.00 – 0.20	Leve
< 0.00	Pobre

*Nota:* La tabla presenta la escala del coeficiente kappa, utilizada para cuantificar el nivel de concordancia entre observadores, propuesta por Landis & Koch, (1977).

**2.2.10 Calidad de suelo**

Estimar la calidad de los suelos contribuye a establecer la sostenibilidad de los diferentes sistemas de manejo. Los suelos con mayor calidad ambiental, son capaces de

mantener una alta productividad y producir mínimo deterioro ambiental. En general, estos se forman por la meteorización de la roca (material parental) por la acción de varios factores, este material meteorizado, con el tiempo, se va transformado y evolucionando junto con la materia orgánica producida por la vegetación y otros organismos que se establecen sobre él (Serrano Giné & Galárraga Sánchez, 2015).

### **2.2.11 Páramo**

Se considera al páramo como un ecosistema húmedo tropical ubicado normalmente a partir del límite forestal superior (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017a), dominado por vegetación herbácea y arbustiva y a su vez con paisajes bioclimáticos fríos (sobre los 3 200 m.s.n.m.).

En este ecosistema se pueden encontrar dos grandes clasificaciones: el páramo natural en el cual no existen cambios en el uso de suelo por intervención humana y que originalmente está cubierto por algunos pantanos y pajonal con bosquete (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017b) ; y por otro lado el intervenido donde se pueden encontrar poblaciones humanas con enriquecimientos culturales que aportan también como un espacio social que genera beneficios económicos (Serrano Giné & Galárraga Sánchez, 2015)

### **2.2.12 Características físicas del suelo**

Las características físicas desempeñan un papel crucial en el desarrollo adecuado de las plantas, aunque con frecuencia son subestimadas, ya que generalmente se priorizan las propiedades químicas. Sin embargo, para crear un ambiente óptimo para el crecimiento vegetal, es esencial una interacción dinámica entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Las propiedades físicas incluyen aspectos fundamentales como el color, textura, estructura, porosidad, densidad y temperatura. Estas propiedades son el resultado de la interacción de elementos básicos, reflejando su influencia en el comportamiento del suelo y el desarrollo de las plantas (Pereira et al., 2011).

### **2.2.13 Características químicas del suelo**

Las características químicas del suelo son importantes porque determinan qué tan fértil y saludable es para las plantas. El pH del suelo afecta qué nutrientes están disponibles para las raíces, y un pH adecuado es esencial para el crecimiento de las plantas. Además, un

buen equilibrio químico en el suelo mejora su estructura, ayuda a retener agua y favorece la sostenibilidad a largo plazo de los cultivos (Pereira et al., 2011).

#### **2.2.13.1 Color**

El color es un indicador del material dominante, puede servir para determinar el grado de intemperización, la intensidad de los procesos de oxidación-reducción el contenido de materia orgánica y estado de lixiviación o acumulación de compuestos químicos en el suelo (Castro Méndez et al., 2018).

#### **2.2.13.2 Textura del suelo**

Según la (FAO, 2009) la textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

#### **2.2.13.3 Estructura del suelo**

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados (FAO, 2009).

#### **2.2.13.4 Potencial de Hidrógeno (pH)**

El pH indica el grado de acidez de la solución del suelo, pero no la acidez total del suelo. El pH debido a la influencia que tiene sobre el desarrollo de las plantas y la fauna del suelo, incide además en la velocidad y calidad de los procesos de humificación y mineralización, así como en el estado de determinados nutrientes (Pereira et al., 2011).

#### **2.2.13.5 Porcentaje de humedad**

El contenido de humedad del suelo es un factor adicional y esencial en muchos análisis del suelo. Tradicionalmente, se ha expresado como la relación entre la masa de humedad y la masa de la muestra de suelo después de haber sido secada hasta alcanzar un peso constante, o como el volumen de humedad en comparación con el volumen total de la muestra de suelo (Castellanos-Navarrete, 2013).

#### **2.2.13.6 Densidad aparente**

La densidad aparente (DA) es una característica del suelo que se usa con frecuencia en la agricultura, principalmente con respecto a las técnicas de manejo del suelo y el agua. Debido a un aumento en el uso de riego, el uso de agricultura sin labranza y la compactación del suelo, ahora hay más preocupación que nunca sobre la determinación y precisión de su

medición. Debido a su estrecha asociación con otras propiedades del suelo, la DA es el factor que más afecta la productividad de los cultivos. Cuando no se aplican fertilizantes, puede tener un impacto aún mayor en algunas especies que el uso de fertilizantes en sí. Las condiciones de disponibilidad y la tasa de difusión de nutrientes en el suelo están relacionadas con este comportamiento (Salamanca Jiménez et al., 2005).

#### **2.2.14 Servicios ecosistémicos**

En contraposición, el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos culturales que proveen los páramos (bienestar espiritual, recreación, estética paisajística, identidad y herencia cultural, entre otros) atrae la presencia de los seres humanos; arriesgando el potencial del contenido de carbono en los suelos cuando no existe un manejo adecuado que conserve sus funciones (Serrano Giné & Galárraga Sánchez, 2015).

#### **2.2.15 Carbono Orgánico**

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos. La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo. Existen prácticas de manejo que generan un detrimento del COS en el tiempo, a la vez hay prácticas que favorecen su acumulación (Martínez et al., 2008).

## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.**

### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

El estudio mantiene un enfoque mixto, mismo que relaciona métodos cuantitativos y cualitativos para lograr una valoración del ecosistema del páramo en la microcuenca del río Coco. El componente cuantitativo se centra en la recolección y análisis de datos numéricos, como la cuantificación del carbono orgánico en el suelo y la medición de sus características físicas y químicas, lo que permite determinar la influencia del páramo en la captura de carbono y valorar económicamente este servicio ecosistémico. A su vez, el componente cualitativo busca entender los factores sociales y económicos que impulsan los cambios en el uso de suelo y la expansión de la frontera agrícola, recurriendo a observación y análisis de las prácticas de los actores locales.

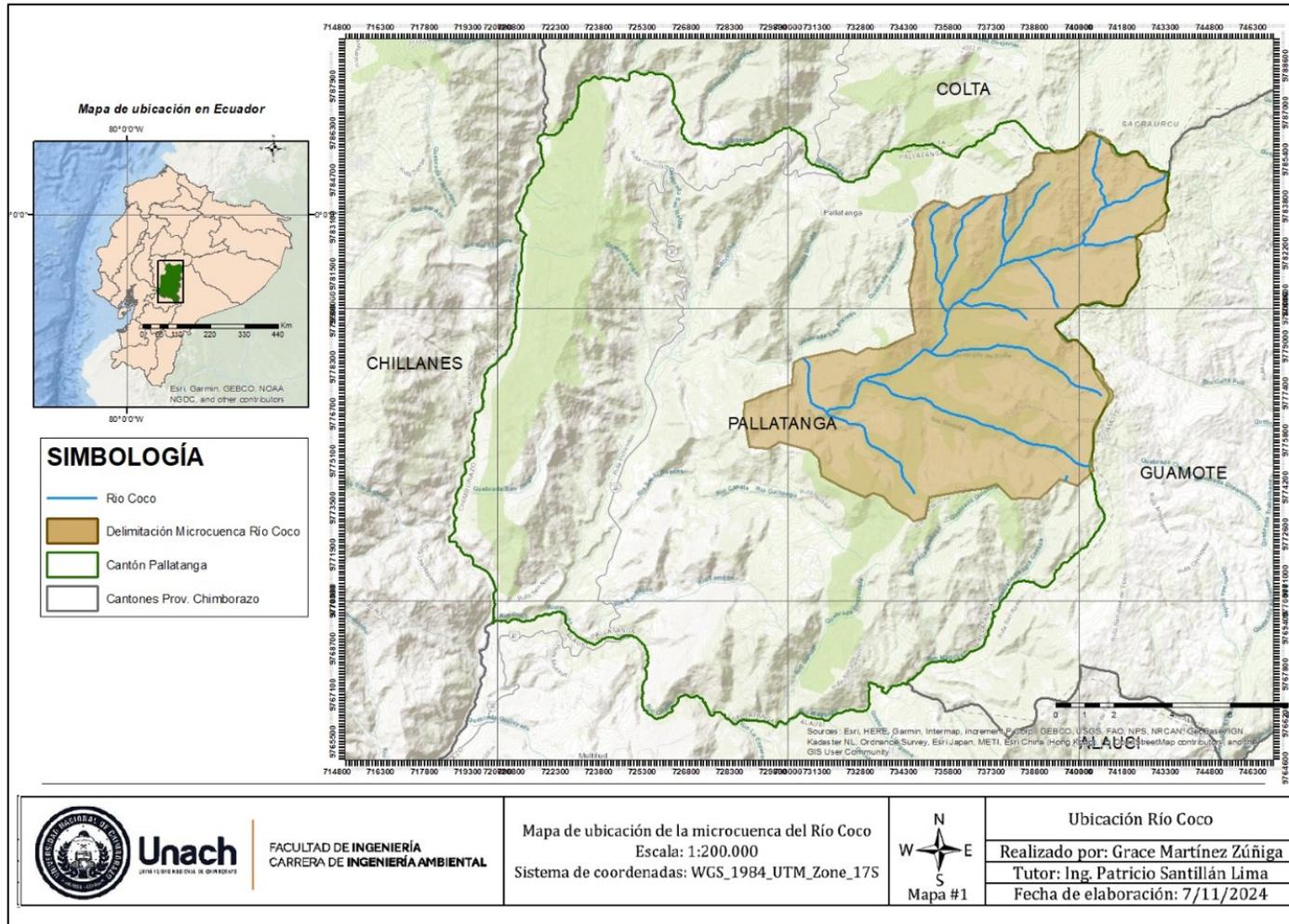
La presente investigación es de tipo explicativa, dado que pretende profundizar en los procesos y causas que afectan la conservación del páramo y su capacidad de almacenamiento de carbono. Además, busca no solo identificar y medir el carbono orgánico y sus beneficios ecosistémicos, sino también cuestionar cómo se dan los cambios en el uso de suelo, y de qué manera estos influyen en la degradación o conservación del ecosistema.

### **3.2 METODOLOGÍA.**

#### **3.2.1 Localización del área de estudio**

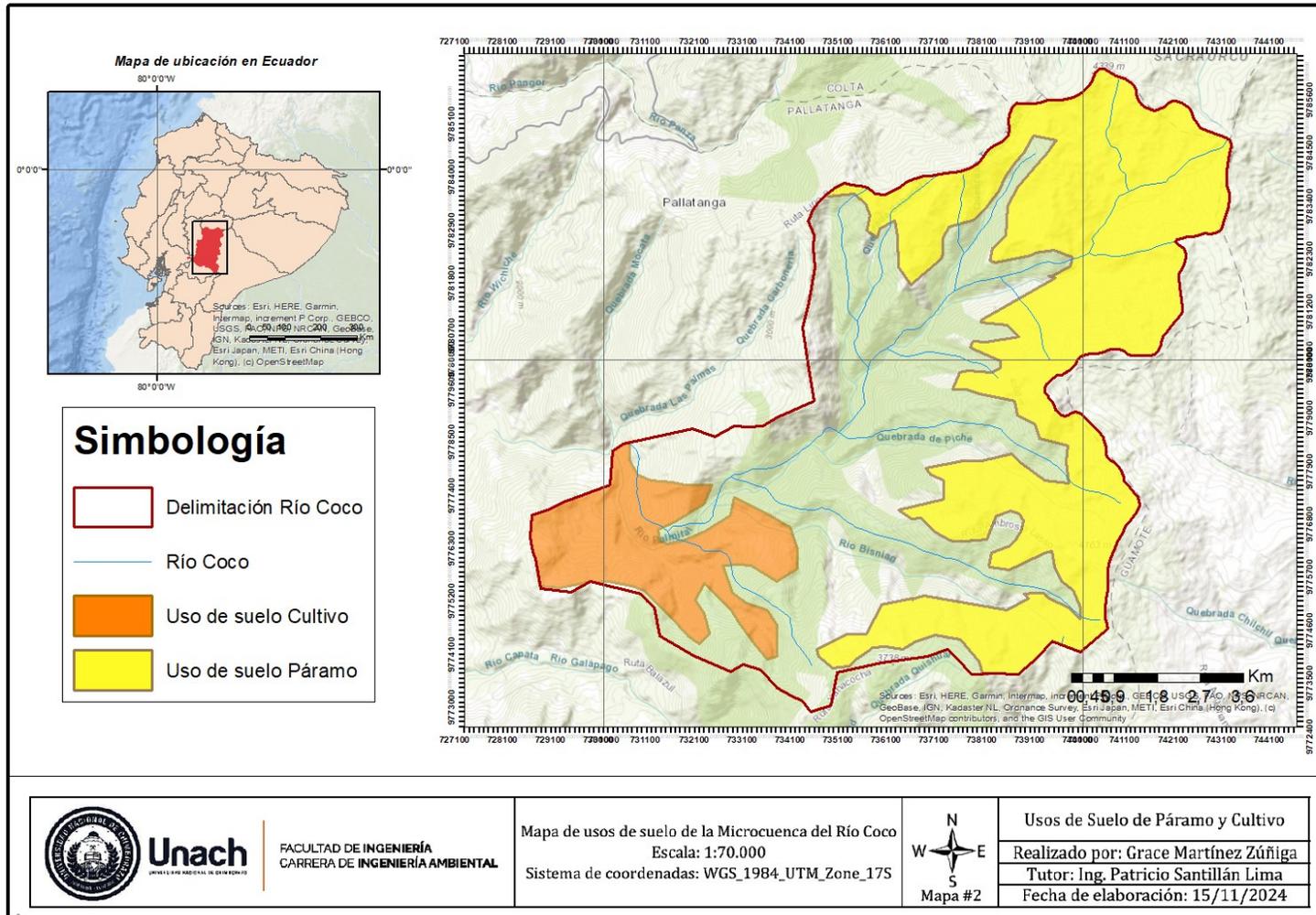
El área de estudio corresponde a la microcuenca del Río Coco que cuenta con un área de 9763,074 Hectáreas ubicado en el cantón Pallatanga, provincia de Chimborazo, Ecuador. Limita al norte con la parroquia Columbe en el cantón Colta, al sur con el cantón Guamote, al este con Alausí, y al oeste con otras áreas de Pallatanga. Sus coordenadas geográficas son 1°35'S 78°30'W. Además, la microcuenca abarca un rango altitudinal considerable, desde los 1500 hasta más de 4000 msnm. Esta variación altitudinal genera una diversidad de suelos y vegetación, factores que influyen directamente en la capacidad de almacenamiento y la distribución del carbono orgánico en el suelo (GAD de Pallatanga, 2021).

**Figura 1**  
*Mapa de ubicación de la Microcuenca del Río Coco.*



*Nota.* El gráfico representa las divisiones cantonales, mostrando cómo se sitúa la microcuenca en relación con áreas vecinas como Colta y Guamote.

**Figura 2**  
 Mapa de usos de suelo de la Microcuenca del Río Coco.



*Nota.* El gráfico representa los Usos de suelo seleccionados dentro de la microcuenca del Río Coco para posterior análisis.

### **3.2.2 Identificación de los cambios de uso de suelo**

#### **3.2.2.1 Selección y preprocesamiento de imágenes satelitales.**

Para el análisis multitemporal de cambios en el uso de suelo en la microcuenca del río Coco, se seleccionaron imágenes satelitales correspondientes a los años 2004, 2014 y 2024, lo cual permitió capturar dinámicas espaciales en tres momentos estratégicos con una separación aproximada de una década. Esta selección temporal fue diseñada para reflejar transiciones importantes en el área de estudio, especialmente aquellas relacionadas con el avance de la frontera agrícola y la conversión del ecosistema de páramo. El proceso de selección y preprocesamiento de las imágenes se desarrolló dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE), la cual permite el acceso a grandes volúmenes de datos geoespaciales y su procesamiento en la nube de forma eficiente (Gorelick et al., 2017).

Para el año 2004, se utilizó una imagen proveniente del satélite Landsat 7, específicamente del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), accediendo a su producto atmosféricamente corregido de reflectancia superficial (Surface Reflectance - SR), denominado LANDSAT/LE07/C02/T1\_L2. Dado que Landsat 7 sufrió desde 2003 la pérdida del Scan Line Corrector (SLC), lo cual genera bandas lineales con pérdida de datos, se seleccionó manualmente una escena específica dentro de un conjunto filtrado por menor cobertura nubosa. Esta revisión manual fue clave para garantizar que la imagen final tuviera una mínima afectación del error SLC-off y cubriera de forma completa y continua la microcuenca. Finalmente, para este año se examinaron 50 imágenes y se eligió la número 14, lo que evidencia la estricta tarea de purificación de datos antes de cualquier procesamiento espectral o clasificación subsiguiente. Este método concuerda con las sugerencias del USGS para la utilización eficaz de imágenes Landsat 7 en investigaciones de cambio de cobertura (USGS, 2022).

En cuanto a los años 2014 y 2024, se utilizaron imágenes provenientes de la misión Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). En el caso de 2014, se tomó como referencia el año 2015 para la imagen más cercana en el tiempo con cobertura libre de nubes, dado que Sentinel-2 inició operaciones a partir de mediados de 2015. La elección de estas imágenes se realizó utilizando el catálogo COPERNICUS/S2\_HARMONIZED, el cual incluye datos armonizados y corregidos para asegurar consistencia temporal. Se filtraron por fechas adecuadas para evitar interferencias atmosféricas estacionales, y se priorizaron aquellas con alta claridad espectral, seleccionando la primera imagen con nula o mínima nubosidad dentro del rango permitido.

Para el año 2014, la selección se concentró en el mes de agosto, por ser uno de los más despejados del calendario hidrológico de los Andes centrales, filtrando entre el 18 y el 29 de agosto de ese año. Al igual que en 2014, se trabajó con imágenes del conjunto armonizado, asegurando así compatibilidad espectral y coherencia en los análisis entre ambos años, con base en los principios de continuidad radiométrica propuestos por (Drusch et al., 2012) .

Además de los filtros temporales y espaciales, todas las imágenes fueron recortadas espacialmente con base en la delimitación hidrológica de la microcuenca del río Coco. Este recorte espacial es fundamental para evitar la inclusión de píxeles externos a la zona de estudio, que podrían distorsionar el análisis de cambio, particularmente en áreas de transición ecológica o altitudinal. De esta forma, la selección final para cada año representó una imagen óptima en términos de cobertura, claridad y representatividad espacial, lo que permitió establecer una base metodológica sólida para las etapas posteriores de análisis.

### **3.2.2.2 Corrección de reflectancia**

Una vez seleccionadas las imágenes óptimas para cada año, se realizó la corrección de reflectancia, esencial en estudios multitemporales, donde se requiere que todas las escenas sean comparables radiométricamente. La reflectancia superficial representa la fracción de radiación solar reflejada por la superficie terrestre, eliminando los efectos de la atmósfera, y constituye el insumo base para calcular índices espectrales y realizar clasificaciones con algoritmos de aprendizaje automático. Sin esta corrección, los valores digitales capturados por los sensores estarían afectados por la dispersión y absorción de gases y aerosoles, haciendo que una misma cobertura refleje valores diferentes en distintas fechas o condiciones climáticas (Chander et al., 2009; Song et al., 2001).

Para la imagen de 2004 proveniente de Landsat 7, si bien el producto ya se encuentra corregido atmosféricamente en el catálogo de GEE, se aplicó una transformación adicional para ajustar los valores de reflectancia a su escala real, utilizando el factor de escala provisto por el USGS: cada banda fue multiplicada por 0.0000275 y se le restó 0.2. Esta transformación es parte del protocolo oficial del USGS para convertir los valores enteros almacenados en los productos L2 a reflectancia real en superficie, permitiendo su uso confiable en el cálculo de índices y en procesos de clasificación supervisada (Chander et al., 2009; USGS, 2022). Este ajuste fue implementado directamente en el script en GEE, asegurando que los valores espectrales fueran representativos de las condiciones reales del terreno.

En el caso de Sentinel-2, tanto para 2014 como para 2024, se utilizaron imágenes del producto de nivel L2A, el cual ya viene corregido atmosféricamente por el algoritmo Sen2Cor, desarrollado por la European Space Agency (ESA). Este algoritmo aplica correcciones basadas en modelos radiativos, considerando las condiciones atmosféricas locales, la geometría solar y las características del terreno, incluyendo una corrección topográfica en base a modelos digitales de elevación. La ventaja de usar el producto L2A es que ya está preparado para análisis espectrales avanzados, y su uso es ampliamente recomendado en estudios de teledetección de cambio de cobertura y monitoreo ambiental (Main-Knorn et al., 2017; European Space Agency (ESA), 2022).

La aplicación de estas correcciones garantiza que los valores de reflectancia sean consistentes entre los distintos años analizados, eliminando la variabilidad inducida por las condiciones atmosféricas o las diferencias entre sensores. Esto permite que cualquier diferencia detectada entre imágenes corresponda efectivamente a un cambio en la superficie terrestre y no a una distorsión en la captura de datos.

### **3.2.2.3 Cálculo de NDVI, NDWI y adición de elevación**

Una vez obtenidas las imágenes satelitales preprocesadas y corregidas radiométricamente para cada año de estudio (2004, 2014 y 2024), se procedió al cálculo de dos índices espectrales fundamentales para la discriminación de coberturas vegetales y cuerpos hídricos: el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDWI (Índice de Diferencia Normalizada de Agua). Adicionalmente, se integró una capa de elevación a cada imagen con el fin de aumentar la capacidad de discriminación espectral del modelo de clasificación, especialmente en ecosistemas de alta montaña como los páramos, donde la altitud es un factor crítico para definir los límites ecológicos de muchas coberturas (Buytaert et al., 2006).

El cálculo de los índices NDVI y NDWI se realizó directamente en la plataforma Google Earth Engine (GEE) utilizando las imágenes previamente seleccionadas. Para el NDVI, se aplicó la fórmula estándar establecida por Rouse et al. (1974). En el caso específico de la microcuenca del río Coco, el NDVI fue esencial para identificar zonas de páramo, áreas agrícolas y coberturas boscosas, dada su sensibilidad a la biomasa fotosintéticamente activa.

Por otro lado, el NDWI fue calculado para todas las imágenes mediante la fórmula propuesta por McFeeters en 1996, que toma en cuenta la diferencia entre el verde (GREEN) y el infrarrojo próximo (NIR), multiplicada por su totalidad. Este indicador destaca la existencia de agua superficial y terrenos húmedos, y resulta especialmente valioso para

diferenciar áreas vegetales de áreas con alta humedad o con cuerpos de agua estacionales, como las lagunas de las Altas Andes o los riachuelos vinculados a fuentes de páramo. Su aplicación en esta investigación facilitó la diferenciación de coberturas en áreas donde el NDVI por sí mismo no proporcionaba contrastes adecuados, como en áreas de cultivo húmedo o pastizales próximos a fuentes de agua.

Ambos índices fueron calculados y añadidos como nuevas bandas espectrales a las imágenes de entrada, formando parte del conjunto de variables predictoras del modelo clasificatorio posterior. La inclusión de estos índices no solo mejora la separación entre clases espectrales similares, sino que además reduce la confusión entre coberturas que, a pesar de tener valores similares en las bandas originales, muestran comportamientos distintos en los índices derivados (Lu & Weng, 2007). En este sentido, los valores de NDVI y NDWI constituyen una fuente de enriquecimiento espectral fundamental en los procesos de clasificación supervisada con algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest.

Además de los índices espectrales, se incorporó una banda adicional de elevación derivada del modelo digital de elevación del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), producto generado por la NASA con una resolución espacial de 30 metros. La integración de esta capa radica en el hecho de que la altitud tiene una influencia directa en la distribución de la vegetación y el uso de suelo en zonas de montaña. Esta incorporación predictora mejora considerablemente la capacidad del algoritmo clasificatorio para diferenciar coberturas que son espectralmente similares, pero espacialmente segregadas en términos de altitud.

Es importante resaltar que la metodología utilizada garantiza que el cálculo de los índices y la integración de la altitud sean coherentes en términos espectrales, espaciales y computacionales, ya que todo el proceso fue automatizado en GEE para cada imagen, manteniendo así una estandarización del flujo de trabajo y eliminando cualquier posible sesgo metodológico entre los distintos años analizados ((Kussul et al., 2017)).

#### **3.2.2.4 Preparación de muestras de entrenamiento y validación**

Este proceso define la calidad del modelo de aprendizaje automático, ya que proporciona la información empírica con la cual el algoritmo aprende a reconocer patrones espectrales y espaciales en los datos satelitales. En esta investigación, se optó por una estrategia de muestreo manual mediante digitalización de polígonos dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE), representando distintas clases de uso de suelo según la tipología

definida por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), entidad oficial que rige la categorización de coberturas a nivel nacional.

En el contexto de la clasificación del uso de la tierra, se adoptaron las definiciones operativas establecidas en el Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra (CUT 2022), publicado en octubre de 2023, que establece seis categorías principales a nivel nacional, desglosadas en clases más específicas en el segundo nivel. Estas clases, sus definiciones operativas y fuentes de referencia, se presentan en la tabla 2

**Tabla 2**  
*Categorías de cobertura y Uso de la Tierra*

<b>Nivel I</b>	<b>Nivel II</b>	<b>Definición Operativa</b>	<b>Fuente</b>
<b>Bosque</b>	Bosque Nativo	Ecosistema arbóreo, primario o secundario, regenerado por sucesión natural; caracterizado por la presencia de árboles de diferentes especies, edades y portes variados, con uno o más estratos.	MAE (2016)
	Plantación Forestal	Masa arbórea establecida antrópicamente con una o más especies forestales.	MAE (2011)
<b>Vegetación Arbustiva y Herbácea</b>	Vegetación Arbustiva	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas. Incluyen áreas degradadas en transición a una cobertura densa del dosel.	SINAGAP CLIRSEN (2012)
	Páramo	Vegetación tropical altoandina caracterizada por especies dominantes no arbóreas que incluyen fragmentos de bosque nativo propio de la zona.	SINAGAP CLIRSEN (2012)
	Vegetación Herbácea	Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados específicos, utilizadas con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.	SINAGAP CLIRSEN (2012)
<b>Tierra Agropecuaria</b>	-	Área bajo cultivo agrícola y pastos implantados, o que se encuentran dentro de un sistema de rotación entre estos.	MAGAP – IEE (2012)
<b>Cuerpo de Agua</b>	Natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.	MAE- MAGAP- IEE (2012)
	Artificial	Superficie y volumen de agua estática o en movimiento asociadas con las actividades antrópicas y el manejo del recurso hídrico.	MAE- MAGAP- IEE (2012)
<b>Zona Antrópica</b>	Área Poblada	Áreas principalmente ocupadas por viviendas y edificios destinados a colectividades o servicios públicos.	MAE- MAGAP- IEE (2012)
	Infraestructura	Obra civil de transporte, comunicación, agroindustrial y social.	MAE- MAGAP- IEE (2012)
<b>Otras Tierras</b>	Área sin cobertura vegetal	Espacios geográficos despoblados de vegetación, que por sus limitaciones edáficas, climáticas, topográficas o	MAE- MAGAP- IEE (2012)

		antrópicas, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, o cuyo uso es mínimo.	
	Glaciar	Nieve y hielo localizados en las cumbres de las elevaciones andinas.	MAE-MAGAP-IEE (2012)
<b>Sin Información</b>	-	Corresponde a áreas que no han podido ser mapeadas.	-

Para la construcción del conjunto de entrenamiento se identificaron cuatro clases principales, representativas del mosaico paisajístico de la microcuenca del río Coco: Bosque, Tierra Agropecuaria, Área Antrópica y Páramo. La digitalización de estas clases se realizó en función de la interpretación visual de las imágenes satelitales ya corregidas y enriquecidas con los índices espectrales NDVI, NDWI y la capa de elevación. Este procedimiento se basó tanto en el conocimiento previo del territorio como en la interpretación contextual de cada cobertura. En los scripts de GEE, estas clases fueron representadas como colecciones de features (polígonos vectoriales), almacenadas en variables como Bosque, TierraAgropecuaria, AreaAntrópica y Paramo, las cuales luego fueron combinadas mediante la función `.flatten()` para formar un solo conjunto de entrenamiento homogéneo.

La validación visual directa, combinada con información secundaria como mapas del MAATE y observaciones de campo previas, permitió asegurar que cada polígono de entrenamiento correspondiera realmente a su clase designada. Además, se evitó la inclusión de píxeles mixtos o ambiguos, los cuales podrían introducir ruido y afectar la capacidad predictiva del algoritmo.

Una vez construida la colección de entrenamiento, se procedió al muestreo espectral de los píxeles dentro de cada polígono, extrayendo los valores de las bandas seleccionadas para la clasificación: bandas originales (de Landsat o Sentinel-2), NDVI, NDWI y elevación. Esta extracción se realizó con la función `.sampleRegions()` de GEE, que genera un conjunto de puntos etiquetados, cada uno asociado a su clase de pertenencia y a los valores espectrales de las bandas seleccionadas. Estos puntos conforman la base de datos de entrenamiento con la cual se entrena posteriormente el modelo Random Forest. Tal como se recomienda en la literatura, se mantuvo una proporción balanceada de muestras por clase, evitando así sesgos de representación que podrían afectar el rendimiento del modelo en las clases minoritarias (Foody, 2002)

Posteriormente, se procedió a la división del conjunto de muestras en dos subconjuntos independientes: uno destinado al entrenamiento del algoritmo y otro reservado para la validación interna. Esta separación se realizó de forma aleatoria utilizando la función

*.randomColumn()*, la cual genera un valor aleatorio entre 0 y 1 para cada muestra, permitiendo su clasificación en dos subconjuntos mediante un filtro booleano. Así, el 80% de las muestras fue asignado al conjunto de entrenamiento, mientras que el 20% restante se utilizó como conjunto de prueba para la validación interna del modelo.

Adicionalmente, se incorporó un conjunto externo de validación independiente, conformado por una segunda colección de polígonos de verificación (BosqueV, TierraAgropecuariaV, AreaAntropicaV, ParamoV). Estos polígonos fueron definidos de forma separada y no se solaparon con los polígonos de entrenamiento, asegurando así una evaluación objetiva del modelo clasificatorio. Este tipo de validación cruzada externa es altamente recomendada por autores como Congalton (1991) y Foody (2002), ya que proporciona una medida confiable de la generalización del modelo, es decir, su capacidad para clasificar datos no previamente vistos.

### 3.2.2.5 Clasificación con Random Forest

En esta investigación, el algoritmo fue implementado directamente en la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la función *ee.Classifier.smileRandomForest()* con una configuración inicial de 50 árboles de decisión, valor recomendado por la literatura como punto de partida para obtener buenos resultados sin incurrir en altos costos computacionales (Belgiu & Drăgu, 2016). El modelo fue entrenado con los datos de entrenamiento previamente generados mediante el muestreo de las bandas seleccionadas y de los índices espectrales (NDVI y NDWI), así como la capa de elevación. Esta combinación de variables predictoras permitió capturar tanto las características espectrales como las condiciones topográficas del terreno, incrementando la capacidad del modelo para seleccionar entre clases que pueden compartir rangos espectrales, pero diferenciarse altitudinalmente, como ocurre comúnmente entre páramos y cultivos de ladera.

Una vez entrenado el clasificador, se aplicó a toda la imagen satelital correspondiente a cada año (2004, 2014 y 2024), generando así un mapa temático de clasificación de uso de suelo. Esta operación se realizó mediante la función *.classify()* en GEE, la cual asigna una etiqueta de clase a cada píxel en función del voto mayoritario de los árboles del modelo entrenado. El resultado fue una imagen categórica en la que cada píxel representa una de las clases definidas: bosque, tierra agropecuaria, área antrópica o páramo. Para facilitar la interpretación visual de los resultados, se aplicó una paleta de colores específica, codificando cada clase con un color determinado y coherente en los tres años analizados. Esto permitió una visualización clara y comparable de los cambios de cobertura a lo largo del tiempo.

En la etapa final de esta fase, el modelo entrenado fue evaluado preliminarmente mediante validación cruzada interna, usando las muestras de prueba previamente separadas del conjunto de entrenamiento (20%). Esto permitió generar una matriz de confusión, que muestra la proporción de píxeles correctamente clasificados para cada clase y la tasa de error entre clases. A partir de esta matriz, se calcularon métricas estándar de desempeño del modelo: precisión global (*Overall Accuracy*). También se estimó el índice Kappa, que representa el grado de acuerdo entre la clasificación y la referencia, descontando el efecto del azar. Estas métricas fueron fundamentales para validar la confiabilidad de los resultados antes de proceder a la validación externa y la interpretación de los mapas de cambio.

### **3.2.2.6 Evaluación interna y externa con matriz de confusión, precisión global y el índice Kappa**

Una vez realizada la clasificación de uso de suelo mediante el algoritmo Random Forest para cada uno de los años de estudio, se procedió a la evaluación de la precisión del modelo con el fin de validar la confiabilidad de los mapas generados y garantizar que las asignaciones de clase fueran representativas de la realidad en el terreno. Para ello, se aplicó una estrategia de evaluación mixta que incluyó tanto validación interna (basada en la partición de los datos de entrenamiento) como externa (basada en un conjunto de datos completamente independiente), utilizando métricas estadísticas ampliamente reconocidas en la literatura de teledetección: la matriz de confusión, la precisión global y el índice Kappa.

La evaluación interna del modelo fue implementada dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la división previa de las muestras etiquetadas en dos subconjuntos: 80% para entrenamiento y 20% para prueba. Esta división se generó aleatoriamente mediante la función *.randomColumn()*, que asignó a cada muestra un valor numérico entre 0 y 1, permitiendo su clasificación en los conjuntos *trainingSet* y *testingSet* en función de un umbral de corte del 0.8. El clasificador Random Forest fue entrenado exclusivamente con los datos de *trainingSet*, y su desempeño fue evaluado aplicándolo al conjunto *testingSet*. Posteriormente, se utilizó la función *.errorMatrix()* para generar la matriz de confusión, comparando las clases reales (campo *class*) con las clases predichas por el modelo (campo *classification*).

La matriz de confusión resultante resume las coincidencias y discrepancias entre las clases reales y las clases asignadas por el modelo. Cada fila de la matriz representa las observaciones reales, mientras que cada columna representa las predicciones del modelo. Las entradas diagonales corresponden a clasificaciones correctas, mientras que las entradas fuera de la diagonal indican errores de clasificación.

Complementariamente, se estimó el índice Kappa, una medida de concordancia corregida que toma en cuenta la clasificación que podría haberse producido por azar. Este índice oscila entre -1 (desacuerdo total) y 1 (acuerdo perfecto), siendo un valor superior a 0.75 indicativo de una clasificación de alta fiabilidad (Congalton R & Green K, 2008).

Además de esta validación interna, se implementó una validación externa más rigurosa mediante un conjunto de datos completamente independiente, compuesto por una segunda colección de polígonos vectoriales (BosqueV, TierraAgropecuariaV, AreaAntropicaV, ParamoV) previamente digitalizados. Estos polígonos no fueron utilizados en ningún momento para el entrenamiento del clasificador, y su inclusión permitió verificar la capacidad del modelo para generalizar más allá de los datos con los que fue entrenado, uno de los aspectos más críticos en cualquier análisis de clasificación supervisada.

En esta etapa, se aplicó el modelo de clasificación ya entrenado sobre los píxeles contenidos en los polígonos de verificación, utilizando nuevamente la función `.sampleRegions()` para extraer las bandas y los valores de clase. Luego, se generó una segunda matriz de confusión, esta vez comparando las clases reales con las predichas por el modelo para el conjunto de verificación externo. Los resultados obtenidos reafirmaron la solidez del modelo, mostrando valores de precisión global superiores al 85% y niveles de concordancia (Kappa) consistentes con los obtenidos en la validación interna.

### **3.2.2.7 Exportación del resultado clasificado como GeoTIFF**

La exportación de los resultados obtenidos a partir de la clasificación supervisada en formato GeoTIFF constituyó la etapa final dentro del flujo de procesamiento en Google Earth Engine (GEE), y resultó esencial para trasladar los productos generados a ArcGIS donde se realizaron las operaciones de reclasificación, cuantificación espacial y análisis multitemporal comparativo. Esta exportación no solo asegura la conservación de la estructura espacial de la imagen clasificada, sino también la compatibilidad entre sistemas de información geográfica (SIG).

Para continuar con el procedimiento, se utilizó la función *Export.image.toDrive()* de GEE, que permite almacenar una imagen procesada en el espacio de trabajo personal de Google Drive del usuario. Esta función requiere especificar varios parámetros clave. La resolución de exportación fue definida como 30 metros para las imágenes provenientes de GEE para cada año, para que de esta manera se mantenga una resolución lineal.

Uno de los principales motivos para exportar los resultados en este formato fue permitir su posterior tratamiento en ArcGIS, donde se realizaron procesos clave como la

reclasificación por niveles del MAATE, la conversión de ráster a polígono, la agregación por clase y la valoración de área en hectáreas. La elección del formato GeoTIFF fue estratégica, ya que es ampliamente reconocido por los estándares internacionales de interoperabilidad geoespacial y permite conservar tanto los valores de clase por píxel como las propiedades geográficas (proyección, extensión, resolución).

Cabe señalar que, en el marco de esta exportación, se conservaron los valores numéricos correspondientes a las clases de uso de suelo, lo cual permitió aplicar posteriormente una reclasificación lógica en ArcGIS utilizando la herramienta “*Reclassify*”, asignando a cada valor un nombre descriptivo acorde a la tipología oficial del MAATE. Esta codificación estructurada aseguró que los análisis espaciales posteriores, como la cuantificación del área o la detección de transiciones de cobertura entre años, se realizaran de forma sistemática y sin ambigüedad en la interpretación.

### 3.2.3 Determinación de características físicas y químicas del suelo

### 3.2.4 Establecimiento de puntos de muestro

Se realizó un mapa de la zona de estudio en el cual se colocaron los puntos de muestreo en función de la ecuación 6 de muestra finita y conocida, se determinó el tamaño de la muestra (n):

#### **Ecuación 6**

*Determinación del tamaño de la muestra*

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * N * p * q}{i^2(N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

n= Tamaño muestral

N= Tamaño de la población

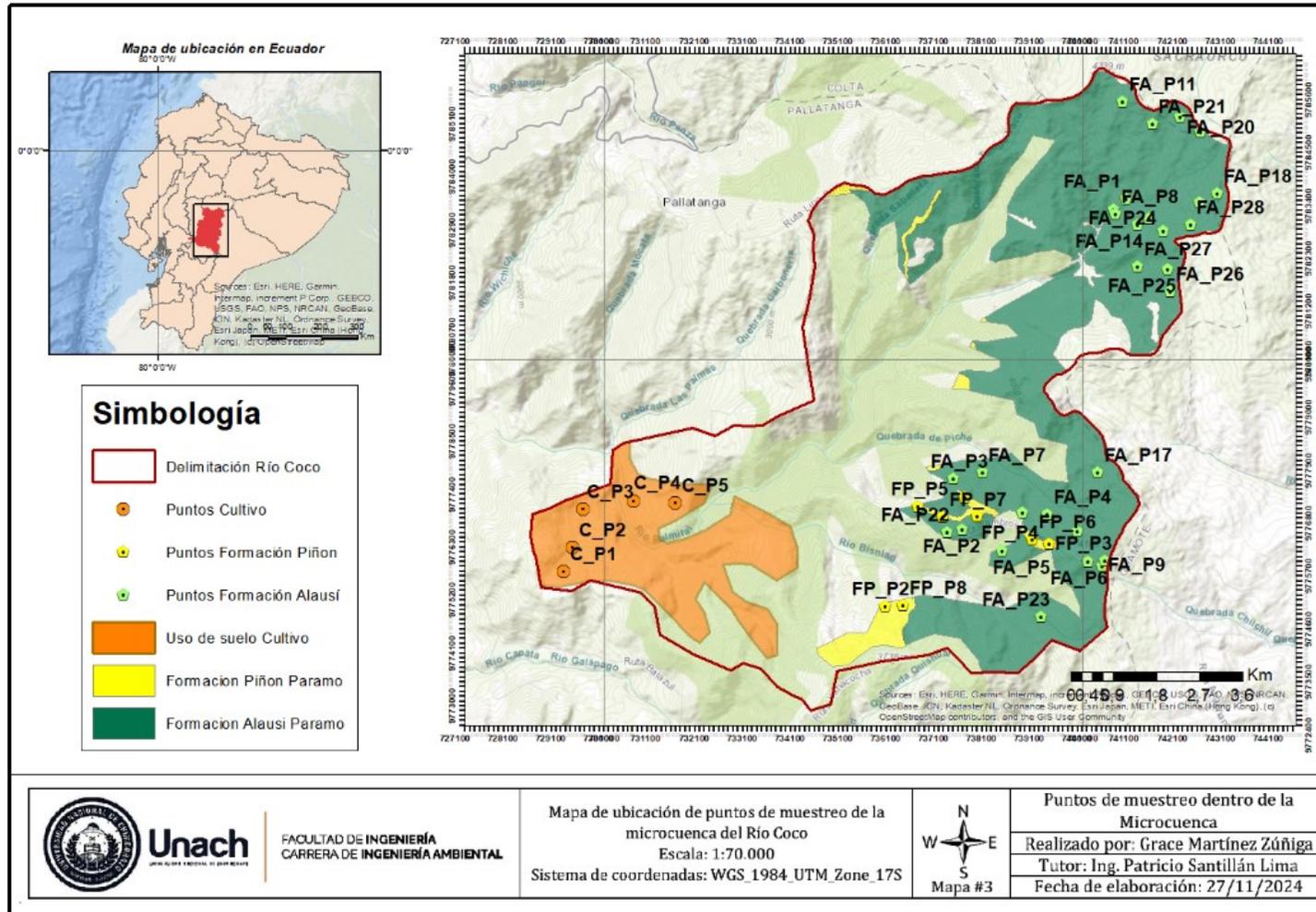
Z= Valor correspondiente a la distribución de Gauss,  $Z_{\alpha=0.05}=1,96$  y  $Z_{\alpha=0.01}=5.58$

p= Prevalencia esperada del parámetro a evaluar, en caso de desconocerse (p=0.5), que hace mayor el tamaño muestral

q= 1-p

i= error que se prevé cometer (si es del 5%, i=0.05)

**Figura 3**  
 Mapa de ubicación de puntos de muestreo.



*Nota.* El gráfico representa los puntos de muestreo seleccionados para cada tipo de formación geológica, tanto para páramo como cultivo.

En las tablas 3 y 4 se presentan las áreas de páramo y cultivo, así como el número de muestras recolectadas para su posterior análisis. Esta distribución de puntos de muestreo se realizó de manera aleatoria, considerando factores clave como accesibilidad del terreno, proximidad a vías de transporte, características topográficas y variabilidad geológica observable. Además, se priorizó dicha recolección en zonas que ofrecieran condiciones representativas de las formaciones geológicas, lo que permitió asegurar una cobertura más completa de la diversidad presente en cada área.

**Tabla 3**

*Superficie de Páramo y número de muestras.*

Nº	Páramo	Área (ha)	Nº muestra
1	Formación Alausí	3643,96	30
2	Formación Piñón	239,12	8
Total		3883,08	38

**Tabla 4**

*Superficie de Cultivo y número de muestras.*

Nº	Cultivo	Área (ha)	Nº muestra
1	Formación Piñón	1835,111	5
Total		1835,111	5

### 3.2.5 Recolección de las muestras

En las áreas designadas se utilizó el método del barreno, este consistió en perforar el suelo con ayuda de instrumentos apropiados para la excavación, extracción y preservación del suelo. Se tomaron las muestras a una profundidad de 0-30 cm y fueron etiquetadas con la información necesaria para su identificación (Mendoza & Espinoza, 2017). Posteriormente se almacenaron adecuadamente y se transportaron al laboratorio para su análisis.

### 3.2.6 Caracterización del Suelo

De acuerdo con la “Guía para la Descripción de Suelos” de la (FAO, 2009), se caracterizaron los siguientes parámetros: color, textura, estructura, densidad aparente, pH, humedad, MO y COS.

### 3.2.6.1 Color

La determinación de color se realizó mediante el diagnóstico de matices, valores y cromas como se muestra en la Tabla de Colores de Suelo Munsell. Las lecturas fueron registradas en suelo húmedo (FAO, 2009).

#### Figura 4

*Análisis de Color de Suelo con la Tabla Munsell*



*Nota.* El gráfico representa una carta de colores Munsell, utilizada para clasificar suelos según su color. Las muestras están organizadas por niveles de valor (luminosidad) y cromas (intensidad). Esta carta corresponde al tono "7.5YR", un matiz entre amarillo y rojo.

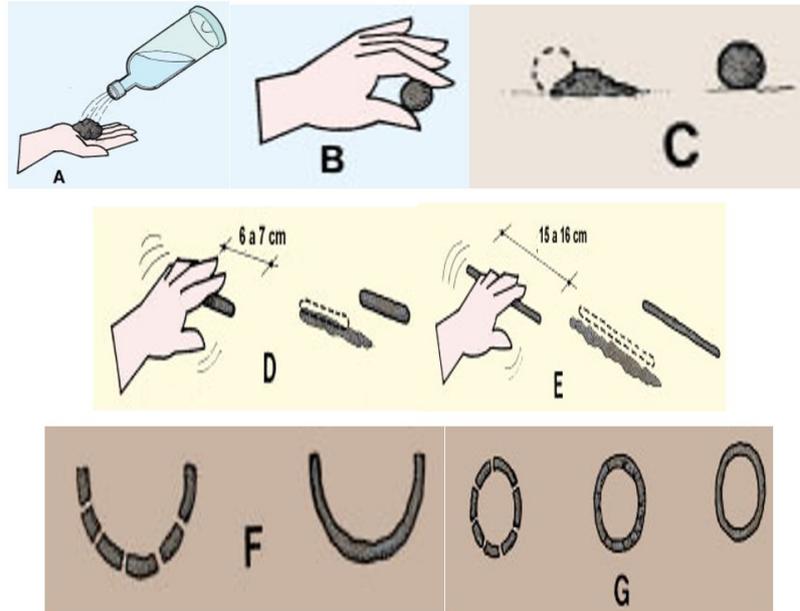
### 3.2.6.2 Textura

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 (Figura 5) dio una idea mejor de la textura del suelo. Esta prueba se realizó de acuerdo al siguiente detalle descrito por la (FAO, 2009):

**Figura 5**

*Determinación de la Textura del Suelo por el Método de sensibilidad del tacto (organoléptico) y prueba de manipulación*



*Nota.* La imagen ilustra el método manual para determinar la textura del suelo, basado en la manipulación de una muestra humedecida.

- Se toma una muestra de suelo (A); y se moja un poco en la mano hasta que sus partículas comienzan a unirse, pero sin que se adhiera a la mano;
- Se debe amasar la muestra de suelo hasta que forme una bola de unos 3 cm de diámetro (B);
- Deje caer la bola (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);
- 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);
- 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.

### 3.2.6.3 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.

### 3.2.6.4 pH del suelo

Para medir el pH se colocó 10 gramos de suelo y 25 ml de agua destilada en un vaso de precipitación de 50 ml, las muestras fueron agitadas durante 30 minutos, posteriormente sumergiendo el bulbo del electrodo del pH metro se realizó la medición (FAO, 2022).

### 3.2.6.5 Porcentaje de humedad

La Ecuación 7 expresa la humedad del suelo como el porcentaje que representa la relación entre el peso del agua presente en una masa de suelo y el peso de sus partículas sólidas. Esta se determinó mediante el método gravimétrico, que consiste en secar la muestra de suelo en una estufa a 105 °C durante 24 horas, siguiendo la metodología propuesta por la FAO, (2009)

#### Ecuación 7

*Porcentaje de humedad del suelo*

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

### 3.2.6.6 Densidad aparente

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 etiquetada 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 (8).

### **Ecuación 8**

*Fórmula para calcular la densidad aparente*

$$D_{ap} = \frac{\text{Masa del suelo seco}}{\text{Volumen total de la muestra}}$$

*Nota:* la densidad aparente expresada en g/cm<sup>3</sup>

### **3.2.7 Determinación de porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS)**

Para la determinación del % COS se utilizó el factor Van Bemmelen de (1.724), siendo este uno de los métodos más utilizados para este tipo de cálculo, el cual hace referencia a que el 58% de la MO está compuesta por CO. Es así que se utilizó la ecuación:

### **Ecuación 9**

*Fórmula para calcular el porcentaje de carbono orgánico en el suelo (COS)*

$$\% CO = \% MO * 1.724$$

La materia orgánica se determinó midiendo y diferenciando el contenido mineral de las muestras usando la Pérdida por Ignición (LOI) (Chambers & Beilman, 2011). La determinación de carbono y materia orgánica mediante calcinación se fundamentó en la pérdida de peso de la muestra de suelo al haber sido expuesta a altas temperaturas. En este caso, se utilizó una temperatura de 550°C durante 4 horas en una mufla.

El método LOI requirió como pretratamiento triturado y tamizado de la muestra para obtener partículas de 100 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 (Ecuación).

### **Ecuación 10**

*Cálculo del porcentaje de materia orgánica*

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

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 CO<sub>2</sub> por hectárea), para determinar el contenido actual, de acuerdo con lo establecido por (M. Castro, 2011) en la ecuación (11).

### **Ecuación 11**

*Contenido de C del suelo*

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

Donde:

Da = Densidad del suelo [g/cm<sup>3</sup>]

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 se deriva de la proporción estequiométrica entre los pesos moleculares, utilizada para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede generarse a partir de la descomposición del carbono orgánico.

### **3.2.8 Valoración económica del contenido de carbono en el suelo**

Para determinar la valoración económica del contenido de carbono expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea (Ecuación 11), se realizó una multiplicación utilizando los precios establecidos por el Banco Mundial (Castro, 2011). Posteriormente, el resultado obtenido mediante la Ecuación 12 fue extrapolado a toda la superficie del área de estudio. Este procedimiento permitió calcular el valor económico total del contenido de carbono para los diferentes años analizados, según la misma ecuación.

### **Ecuación 12**

*Fórmula para determinar la valoración económica del contenido de carbono*

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

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 RESULTADOS**

#### **CAMBIOS DE USO DE SUELO BAJO PÁRAMO Y CULTIVO RESPONSABLES DEL AVANCE DE LA FRONTERA AGRÍCOLA EN EL PÁRAMO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO COCO, PARA ESTUDIAR SU CONSERVACIÓN**

##### **Selección y preprocesamiento de imágenes satelitales.**

Se consolidó una base de datos satelital compuesta por tres imágenes principales representativas de los años especificados. Estas imágenes fueron seleccionadas en función de su calidad atmosférica, mínima nubosidad y cobertura completa de la microcuenca del río Coco, recortadas espacialmente a su perímetro oficial y corregidas radiométricamente para asegurar la consistencia espectral entre fechas.

##### **Año 2004 – Landsat 7 ETM+**

La imagen satelital correspondiente al año 2004 fue seleccionada a partir de la colección LANDSAT/LE07/C02/T1\_L2, destacándose por presentar una cobertura visual limpia, sin interferencias visibles por nubes o sombras. Tras su recorte espacial y corrección de reflectancia, la imagen permitió identificar con claridad la distribución de los principales tipos de cobertura en ese momento. En las partes altas de la microcuenca, la cobertura vegetal natural era predominante, con una marcada presencia de páramo que cubría de manera continua amplias zonas del noreste y suroeste. Estas áreas presentaban firmas espectrales homogéneas, lo cual facilitó su diferenciación respecto a zonas con uso agropecuario. Las zonas bajas y medias, por su parte, mostraban manchas irregulares correspondientes a cultivos dispersos y pequeñas áreas intervenidas, lo que sugiere que, para este año, la presión agrícola aún no era dominante pero sí estaba en expansión.



### **Año 2014 – Sentinel-2 (imagen 2015)**

Para representar el año 2014, se utilizó la imagen Sentinel-2 más próxima y limpia del año 2015, procesada como producto L2A, ya corregido radiométricamente. Esta imagen permitió identificar transformaciones notorias con respecto al patrón observado en 2004.

Uno de los cambios más significativos observados fue la fragmentación del páramo en zonas donde previamente había cobertura continua. En las áreas del centro-este y parte baja de la cuenca, los patrones espectrales revelaron una intensificación del uso agrícola. Se observaban parcelas rectangulares y patrones geométricos que evidencian organización productiva, contrastando fuertemente con las texturas naturales del páramo.



## **Año 2024 – Sentinel-2**

La imagen correspondiente al año 2024 fue seleccionada entre las fechas con mejores condiciones atmosféricas en agosto, y mostró de manera clara una transformación avanzada del paisaje. En comparación con los años anteriores, se evidenció una expansión significativa de la frontera agrícola, especialmente hacia las partes medias y altas de la microcuenca, donde antes predominaban coberturas naturales.

Esta imagen reveló una mayor homogeneización del paisaje productivo, con zonas anteriormente heterogéneas transformadas en unidades agrícolas extensas. Áreas que en 2004 todavía mostraban parches de vegetación natural, en 2024 aparecieron como bloques agrícolas, claramente delineados por límites de cultivo. Incluso se identificaron pequeñas concentraciones antrópicas, reflejadas espectralmente como superficies reflectivas asociadas a techos o superficies selladas.



Tras su preprocesamiento y corrección, estas imágenes constituyeron la base sobre la cual se calcularon los índices espectrales y se aplicaron los modelos clasificatorios. En términos de calidad visual, las imágenes revelaron cambios progresivos en la estructura del área seleccionada, siendo evidente una tendencia de expansión agrícola hacia zonas que anteriormente mantenían una cobertura natural. La claridad de los contrastes espectrales obtenidos luego del ajuste de reflectancia confirmó que las condiciones de procesamiento fueron adecuadas para llevar a cabo un análisis de cambio de uso de suelo robusto y científicamente válido, tal como se recomienda en estudios de monitoreo de coberturas terrestres (Chander et al., 2009; Song et al., 2001)

### **Corrección de reflectancia**

A través de este procedimiento, se generaron productos espectrales coherentes entre los tres años analizados, lo que permitió una comparación directa y objetiva de los valores espectrales por píxel en cada imagen. Al eliminar los efectos de dispersión atmosférica, variaciones en la iluminación solar y diferencias de captura entre sensores, fue posible trabajar con datos representativos de las condiciones reales de la superficie terrestre, lo cual resultó clave para la aplicación de índices espectrales y algoritmos de clasificación supervisada en fases posteriores del análisis (Chander et al., 2009; (Song et al., 2001).

El proceso de corrección aplicado permitió que los valores de reflectancia obtenidos en bandas clave como el rojo, infrarrojo cercano (NIR) y SWIR, fueran comparables entre los tres periodos de estudio, cumpliendo así con el principio de estandarización temporal fundamental en análisis multitemporales.

La corrección de reflectancia aplicada a la imagen Landsat 7 del año 2004 se ejecutó y mostró un contraste más nítido entre coberturas, con áreas de páramo exhibiendo valores medios de reflectancia en el infrarrojo cercano, y zonas de cultivo con variabilidad mayor, debido a la mezcla de suelos desnudos y vegetación. Esta diferenciación espectral permitió que, posteriormente, el cálculo de índices como el NDVI y NDWI fuera más estable y confiable. De la misma manera para la imagen utilizada como representación del año 2014, correspondiente a Sentinel-2 del año 2015, provino del producto L2A ya corregido e incluye correcciones atmosféricas y topográficas automatizadas, permitiendo trabajar directamente con reflectancia en superficie sin necesidad de ajustes adicionales.

Los valores espectrales de esta imagen mostraron alta consistencia, especialmente en las bandas ópticas clave para análisis de vegetación. Las zonas de páramo que aún

permanecían, especialmente en las áreas altas del norte y suroeste de la cuenca, se distinguieron claramente de los cultivos emergentes que ya ocupaban las zonas intermedias.

Por otro lado, la imagen Sentinel-2 correspondiente al año 2024, también en nivel L2A, presentó condiciones espectrales consistentes con el producto de 2015, lo que facilitó su uso en análisis multitemporales. La homogeneidad entre ambas imágenes permitió asegurar que las diferencias observadas en el comportamiento espectral de las coberturas obedecieran a transformaciones reales del uso del suelo y no a sesgos radiométricos.

En esta imagen, la reflectancia en bandas sensibles a la vegetación fue determinante para evidenciar el avance de la frontera agrícola. Zonas que en 2004 y 2014 mantenían valores altos de NIR (indicativos de vegetación vigorosa) pasaron a mostrar valores bajos o heterogéneos, propios de suelos expuestos o cultivos rotativos. Este cambio se reflejó también en la disminución de zonas con respuesta espectral homogénea, característica del ecosistema de páramo.

### **Cálculo de NDVI, NDWI y adición de elevación**

Tras la corrección de reflectancia, se procedió al cálculo de los índices espectrales NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y NDWI (*Normalized Difference Water Index*), así como a la adición de la variable topográfica elevación, para cada una de las imágenes correspondientes a los años correspondientes. Estos indicadores fueron incorporados como bandas adicionales en las imágenes de entrada, enriqueciendo significativamente la matriz espectral de análisis.

El NDVI permitió diferenciar con alta precisión las áreas cubiertas por vegetación natural, bosques, cultivos activos y suelos desnudos. (Tucker, 1979;Pettorelli et al., 2005). Por su parte, el NDWI permitió identificar cuerpos de agua y zonas con alto contenido de humedad superficial, mejorando la delimitación de áreas de ese tipo.

Finalmente, la capa de elevación, derivada del modelo SRTM y añadida a cada una de las imágenes, permitió fortalecer la capacidad del algoritmo de clasificación para discriminar entre coberturas similares en comportamiento espectral pero diferenciadas por su altitud. Esta capa fue especialmente relevante para diferenciar áreas de páramo (generalmente sobre los 3.200 m s.n.m.) de coberturas agrícolas o boscosas en zonas más bajas, lo que se alinea con la importancia del gradiente altitudinal en ecosistemas andinos (Buytaert et al., 2006).

En 2004, a partir de imágenes Landsat 7, el NDVI mostró una alta cobertura vegetal en las zonas de páramo y bosques, con valores superiores a 0,5 e incluso 0,7,

respectivamente, lo que reflejaba un ecosistema bien conservado, especialmente en sectores altos y de difícil acceso. Complementariamente, el NDWI permitió identificar zonas húmedas adyacentes a fuentes hídricas menores, mientras que la capa de elevación ayudó a delimitar claramente las coberturas de páramo por encima de los 3.200 metros. Sin embargo, ya para el siguiente año de estudio, se evidenció una disminución notable del NDVI en sectores centro-orientales, que pasó de valores cercanos a 0,6 en 2004 a apenas 0,4, lo cual sugiere una pérdida de vegetación densa debido al avance de actividades productivas. A pesar de esto, persistieron núcleos de conservación en páramos de acceso restringido.

Esta tendencia de transformación se intensificó en 2024, donde el análisis Sentinel-2 reveló una marcada reducción en la cobertura vegetal, con valores NDVI entre 0,2 y 0,4 en zonas previamente bien conservadas. La pérdida fue particularmente evidente en la parte suroeste de la microcuenca, donde los antiguos parches de páramo fueron reemplazados por estructuras agrícolas.

### **Preparación de muestras de entrenamiento y validación**

Esta fase permitió construir una base de datos categorizada, espacialmente representativa y espectralmente diversa, que dio sustento al modelo de clasificación supervisada implementado en esta investigación. En línea con lo propuesto en la metodología, se trabajó con cuatro clases principales de uso de suelo: bosque, tierra agropecuaria, área antrópica y páramo, siguiendo niveles definidos por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

Sobre cada imagen preprocesada y corregida se realizó una digitalización manual de muestras con base en la interpretación visual, el análisis de índices espectrales (NDVI y NDWI), la capa de elevación y el conocimiento previo del territorio. Para cada categoría de uso de suelo, se definieron entre 20 y 50 puntos de entrenamiento, seleccionados estratégicamente en zonas homogéneas, sin mezcla de coberturas, y distribuidos espacialmente en distintos sectores de la microcuenca. Esta estrategia responde a las recomendaciones metodológicas de Congalton y Green (2008), quienes señalan que una clasificación precisa depende en gran medida de la calidad y representatividad de las muestras utilizadas para entrenar el modelo.

Los puntos fueron distribuidos en intervalos numéricos claramente diferenciados por clase en los scripts implementados en Google Earth Engine (GEE), lo que facilitó su organización y posterior muestreo espectral. Por ejemplo:

- **Bosque:** se digitalizaron 50 puntos, localizados en sectores con vegetación densa y cobertura natural estable y patrones espectrales continuos.
- **Tierra agropecuaria:** se ubicaron entre 20 y 50 puntos, sobre zonas con actividad agrícola evidente y respuestas heterogéneas en las bandas visibles e infrarrojas.
- **Área antrópica:** se definieron 20 puntos, sobre áreas urbanizadas, techos u otras superficies construidas, con baja vegetación y firmas espectrales reflectivas.
- **Páramo:** se establecieron 50 puntos, en zonas de alta montaña (elevación >3.200 m.s.n.m.), con vegetación herbácea natural y valores altos de NDVI, pero distinta a los bosques por su densidad.

Cada conjunto de puntos fue sometido al proceso de muestreo espectral con la herramienta *.sampleRegions()* de GEE, extrayendo los valores de las bandas originales, los índices NDVI, NDWI y la variable de elevación. Estos datos conformaron la base para entrenar el algoritmo de clasificación Random Forest.

Posteriormente, el conjunto completo de datos fue dividido aleatoriamente en dos subconjuntos mediante *.randomColumn()*: 80% de las muestras fue utilizado para entrenar el modelo, mientras que el 20% restante fue reservado para validación interna, permitiendo una estimación objetiva del rendimiento del clasificador sobre datos no vistos. Esta técnica de división aleatoria y proporcional ha sido ampliamente recomendada en estudios de teledetección por su efectividad para evitar sobreajuste y evaluar la capacidad predictiva real del modelo (Foody, 2002; Pal, 2005).

Además, se creó un conjunto independiente de verificación externa, mediante una nueva digitalización de polígonos distintos para cada clase (BosqueV, TierraAgropecuariaV, AreaAntropicaV, ParamoV). Estos polígonos no se superpusieron con las zonas de entrenamiento, y su análisis posterior permitió realizar una validación cruzada que fortaleció la confiabilidad del modelo, de acuerdo con lo recomendado por Congalton (1991) en la evaluación de precisión de clasificaciones.

Como resultado de este proceso, se obtuvieron bases de datos estructuradas, balanceadas y espacialmente diversas, listas para su uso en los modelos clasificatorios de cada año. La correcta separación espectral observada entre clases en los valores extraídos confirmó la calidad de las muestras y la viabilidad de la clasificación supervisada basada en aprendizaje automático.

## **Clasificación con Random Forest**

La aplicación del algoritmo de clasificación supervisada Random Forest en las imágenes multitemporales de los años 2004, 2014 y 2024 generó productos cartográficos altamente consistentes, permitiendo la diferenciación clara entre las clases de uso de suelo previamente establecidas: bosque, tierra agropecuaria, área antrópica y páramo. El modelo fue entrenado con los conjuntos de muestras construidos específicamente para cada año, integrando como variables predictoras las bandas espectrales, los índices NDVI y NDWI, y la elevación.

Durante la clasificación, se optó por configurar el modelo con un número inicial de 50 árboles (nTrees), sin embargo, luego de realizar diversas pruebas el número fue ajustado para obtener un mejor desempeño. La asignación de clases por píxel se basó en el voto mayoritario de los árboles del modelo, generando imágenes clasificadas categóricas con valores únicos por clase.

El resultado final fue una imagen clasificada por año, en la que se identificaron patrones espaciales claros, coherentes y comparables, revelando la transformación progresiva del paisaje. Las clases fueron visualizadas con una simbología constante específica, lo que facilitó la interpretación y comparación visual multitemporal. Esta metodología permitió detectar con claridad los procesos de cambio, expansión y pérdida de cobertura, confirmando la eficiencia de Random Forest en contextos de alta heterogeneidad espacial (Belgiu & Drăgu, 2016; Rodriguez-Galiano et al., 2012).

El algoritmo Random Forest permitió capturar estos patrones de cambio con alta fidelidad, identificando claramente las zonas de transformación. La integración de la variable de elevación fue fundamental para evitar confusiones entre páramo y cultivos de altura, especialmente en las zonas de transición.

## **Evaluación interna y externa con matriz de confusión, precisión global y el índice Kappa**

La evaluación de la precisión del modelo de clasificación supervisada mediante Random Forest permitió medir de manera cuantitativa la calidad de las clasificaciones obtenidas para los años 2004, 2014 y 2024. Para ello, se aplicaron dos tipos de validación: la validación interna, basada en el 20% de los datos reservados durante el proceso de entrenamiento, y la validación externa, fundamentada en polígonos de verificación independientes construidos específicamente para cada clase de uso de suelo. En ambos casos, se utilizaron matrices de confusión para estimar la precisión global y el índice Kappa,

tal como recomiendan Congalton (1991) y Foody (2002) en estudios de evaluación de clasificaciones en teledetección.

De forma general, los resultados obtenidos reflejan una elevada precisión y una alta concordancia entre las clases predichas y las clases de referencia en los tres momentos temporales analizados. En el año 2004, los resultados obtenidos en la validación interna indicaron un comportamiento perfecto del clasificador. La matriz de confusión mostró que todas las muestras fueron clasificadas correctamente dentro de su categoría correspondiente, logrando una precisión global de 100%. Las clases fueron reconocidas sin errores de omisión ni de comisión, este nivel en la validación interna refleja la claridad espectral de las coberturas en ese año, así como la efectividad de la selección de variables predictoras. Sin embargo, al aplicar la validación externa mediante un conjunto independiente de polígonos, la precisión global descendió ligeramente a 93.75% y el índice Kappa fue de 0.9167.

**Tabla 5**  
*Matriz de confusión y Kappa 2004*

<b>Clasificación</b>	<b>Bosque</b>	<b>Tierra Agrícola</b>	<b>Páramo</b>	<b>Área Antrópica</b>	<b>Total</b>	<b>Error de Comisión</b>	<b>Exactitud del Usuario</b>
<b>Bosque</b>	9	0	0	0	9	0%	100%
<b>Tierra Agrícola</b>	0	5	0	0	5	0%	100%
<b>Páramo</b>	0	0	14	0	14	0%	100%
<b>Área Antrópica</b>	0	0	0	7	7	0%	100%
<b>Total</b>	9	5	14	7	35		
<b>Error de Omisión</b>	0%	0%	0%	0%			
<b>Exactitud del Productor</b>	100%	100%	100%	100%			
<b>Precisión Global:</b>	<b>1 (100%)</b>						
<b>Kappa:</b>	<b>0.9167</b>						

Para el año 2014, la validación interna obtuvo una precisión global perfecta del 100%. Esto se atribuye tanto a la mayor resolución espectral de Sentinel-2 como a la calidad mejorada en la diferenciación de coberturas gracias al uso de índices espectrales y elevación. Cuando se evaluó el desempeño del modelo sobre los datos de validación externa, la precisión global fue de 96.25% y el índice Kappa alcanzó 0.9500, valores considerados como indicadores de un acuerdo muy aceptables (Congalton R & Green K, 2008).

**Tabla 6**  
*Matriz de confusión y Kappa 2014*

<b>Clasificación</b>	<b>Bosque</b>	<b>Tierra Agrícola</b>	<b>Páramo</b>	<b>Área Antrópica</b>	<b>Total</b>	<b>Error de Comisión</b>	<b>Exactitud del Usuario</b>
<b>Bosque</b>	12	0	0	0	12	0%	100%
<b>Tierra Agrícola</b>	0	7	0	0	7	0%	100%
<b>Páramo</b>	0	0	11	0	11	0%	100%
<b>Área Antrópica</b>	0	0	0	3	3	0%	100%
<b>Total</b>	12	7	11	3	33		
<b>Error de Omisión</b>	0%	0%	0%	0%			
<b>Exactitud del Productor</b>	100%	100%	100%	100%			
<b>Precisión Global:</b>	<b>1 (100%)</b>						
<b>Kappa:</b>	<b>0.9500</b>						

En el año 2024, la evaluación mantuvo los niveles de calidad observados en 2014, a pesar del incremento en la complejidad del patrón de ocupación del suelo. Tanto en la validación interna como externa se obtuvo una precisión global de 96.25% y un índice Kappa de 0.9500, evidenciando la estabilidad del modelo aun frente a un paisaje más heterogéneo y fragmentado. Los páramos remanentes fueron clasificados con alta exactitud, mientras que las coberturas agrícolas mostraron algunos traslapes en zonas de borde. No obstante, el elevado valor de kappa refleja que el modelo logró minimizar estos errores de manera efectiva, reafirmando su capacidad de generalización incluso en condiciones de transformación territorial acelerada.

**Tabla 7**  
*Matriz de confusión y Kappa 2024*

<b>Clasificación</b>	<b>Bosque</b>	<b>Tierra Agrícola</b>	<b>Páramo</b>	<b>Área Antrópica</b>	<b>Total</b>	<b>Error de Comisión</b>	<b>Exactitud del Usuario</b>
<b>Bosque</b>	20	0	0	0	20	0%	100%
<b>Tierra Agrícola</b>	0	19	0	1	20	5%	95%
<b>Páramo</b>	0	0	20	0	20	0%	100%
<b>Área Antrópica</b>	0	2	0	18	20	10%	90%
<b>Total</b>	20	21	20	19	80		
<b>Error de Omisión</b>	0%	5%	0%	10%			

<b>Exactitud del Productor</b>	100%	90.48%	100%	90%
<b>Precisión Global:</b>	<b>0.9625 (96.25%)</b>			
<b>Kappa:</b>	<b>0.9500</b>			

Todas las clasificaciones presentaron precisiones globales superiores al 93% y valores de kappa mayores a 0.91, lo que, según los criterios de interpretación de Congalton (1991), corresponde a un grado de acuerdo muy fuerte. Esto evidencia que el modelo Random Forest fue capaz de distinguir de manera eficaz entre las diferentes coberturas del suelo, incluso en un escenario de alta heterogeneidad espacial como el de la microcuenca del Río Coco.

### **Exportación del resultado clasificado como GeoTIFF**

La exportación de los resultados fue realizada dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la función *Export.image.toDrive()*, configurada para garantizar la máxima fidelidad espacial y radiométrica de los productos generados. Esta fase no solo preservó las clases de uso de suelo en formato categórico (valores enteros), sino que también permitió asegurar que cada píxel mantuviera su clase asignada durante la clasificación supervisada, sin alteraciones en los valores por interpolación, lo cual es fundamental para estudios de análisis de cambios de cobertura (Gorelick et al., 2017)

La imagen clasificada correspondiente a cada año de forma individual fue exportada como un archivo GeoTIFF de una sola banda, donde cada píxel representaba una clase de uso de suelo codificada numéricamente. La correcta exportación fue fundamental para posibilitar la comparación multitemporal homogénea, evitando errores comunes en análisis longitudinales como desplazamientos espaciales o diferencias de resolución (Hansen M et al., 2013). Posteriormente a la exportación de las imágenes clasificadas en formato GeoTIFF, se procedió a su procesamiento en el entorno de ArcGIS, con el objetivo de estructurar los datos de clasificación en formatos que permitieran la cuantificación espacial precisa de los cambios en el uso de suelo en la microcuenca del río Coco. Este procesamiento incluyó tres etapas fundamentales: reclasificación de clases, transformación de ráster a polígono, y cálculo de superficies por categoría de uso, mismas etapas que dieron paso a productos de alta calidad técnica que facilitaron la comparación multitemporal y el diagnóstico de las dinámicas territoriales en la microcuenca del río Coco. Estos procedimientos responden a metodologías ampliamente aceptadas en estudios de cambio de cobertura terrestre y análisis espacial aplicado .

## **Comparativa multitemporal**

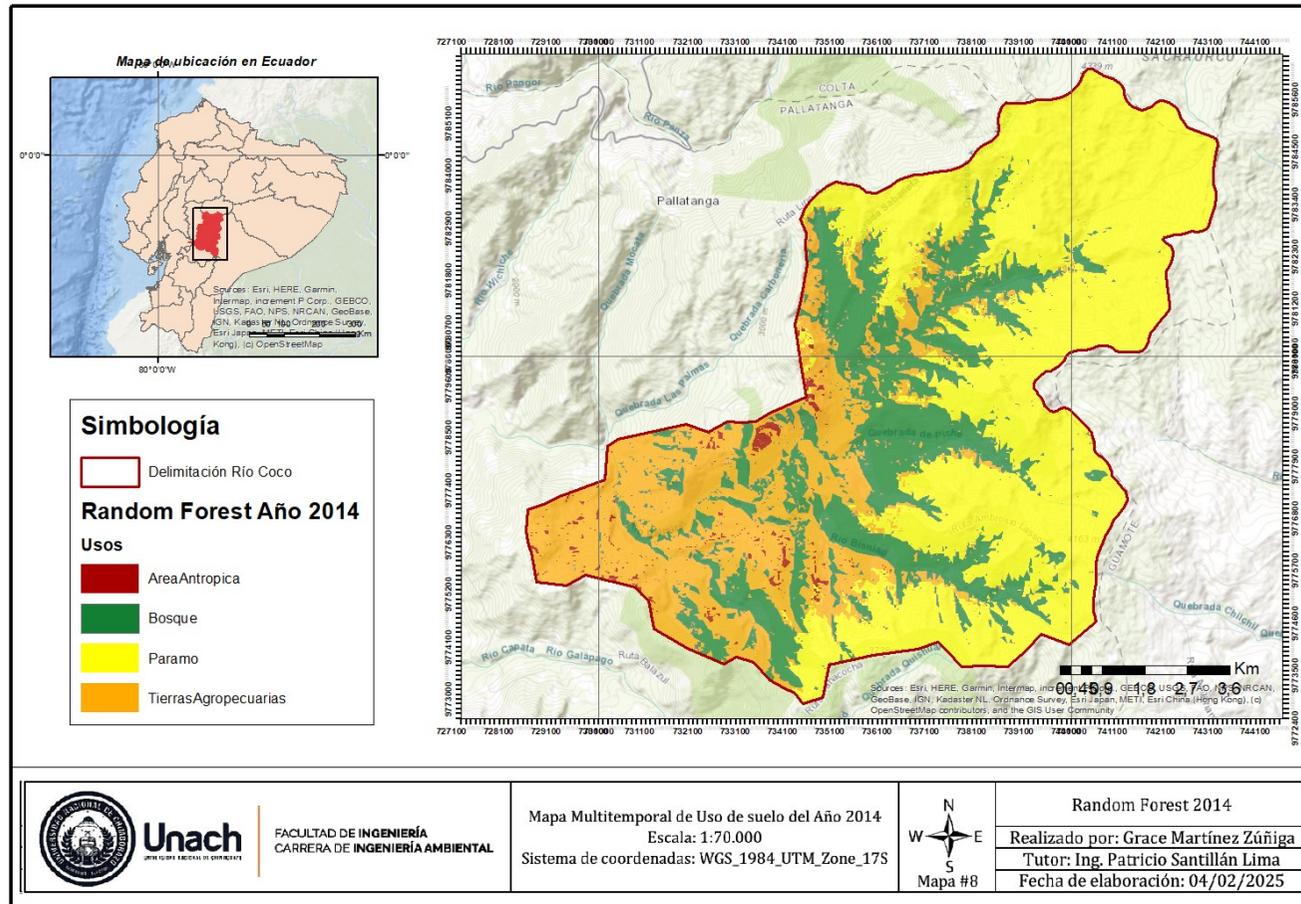
Este análisis se basó en la comparación de las áreas clasificadas y cuantificadas para cada categoría de uso de suelo, utilizando herramientas de análisis espacial en ArcGIS y contrastando los resultados a nivel de polígono. Se observó una tendencia clara hacia la expansión de la tierra agropecuaria y, en consecuencia, una reducción progresiva de la cobertura natural, especialmente en el ecosistema de páramo. Esta dinámica es consistente con los procesos de avance de la frontera agrícola y la transformación de ecosistemas altoandinos que han sido ampliamente documentados en otros estudios de cambio de uso del suelo en la región andina (Buytaert et al., 2006; Tejedor Garavito et al., 2012). Además de la disminución del páramo, también se detectó una reducción menor, pero significativa, de las superficies de bosque, asociada tanto a actividades agropecuarias como a la expansión de áreas antrópicas en sectores bajos y medios de la microcuenca.

El análisis multitemporal no solo permitió cuantificar las pérdidas y ganancias absolutas en superficie de cada clase, sino también identificar los patrones espaciales de cambio, como la fragmentación de coberturas naturales, la consolidación de matrices agrícolas, y la aparición de nuevos núcleos de área antrópica. La comparación de los tres periodos demostró que el proceso de transformación no fue lineal, sino que se aceleró en la última década, siendo el periodo 2014–2024 el de mayor velocidad de cambio territorial.

Durante el primer periodo de análisis, de 2004 a 2014, se detectó una reducción significativa de la superficie de páramo, acompañada por un incremento notable de las áreas agrícolas. La transformación fue especialmente intensa en las zonas de altitud media, donde el acceso y las condiciones edáficas permitieron una expansión más sencilla de la agricultura.



**Figura 10**  
*Mapa Multitemporal de Uso de Suelo Año 2014*



*Nota:* La imagen representa el uso de suelo en la microcuenca del río Coco para el año 2014, donde se observa un incremento de tierras agropecuarias y una ligera disminución de bosque.

La cobertura de bosque mostró una ligera reducción, aunque en menor medida que el páramo. Se identificaron procesos de fragmentación en los bordes de los bosques naturales, sobre todo en sectores cercanos a vías de comunicación rurales. Las áreas antrópicas mostraron una expansión limitada, concentrada en zonas puntuales, principalmente en proximidades de centros poblados menores.

El balance de cambios indicó que el avance de la frontera agrícola fue el principal motor de transformación territorial en este periodo, afectando prioritariamente al ecosistema de páramo.

En el periodo más reciente, de 2014 a 2024, los procesos de cambio se aceleraron considerablemente. El análisis de polígonos vectoriales mostró que la tierra agropecuaria se expandió de manera continua hacia altitudes mayores, invadiendo áreas que históricamente se habían mantenido como páramo intacto. La pérdida de páramo fue aún más severa que en el periodo anterior, tanto en términos de superficie como en grado de fragmentación. Lo que antes eran grandes extensiones continuas de vegetación altoandina se transformaron en terrenos intervenidos de forma antrópica.



El bosque continuó reduciéndose, aunque a un ritmo más moderado, gracias probablemente a la mayor dificultad de transformar zonas boscosas densas comparado con áreas abiertas de páramo. Sin embargo, se observaron nuevas áreas de deforestación localizada.

Las áreas antrópicas incrementaron su presencia, no sólo alrededor de los núcleos poblacionales principales, sino también en nuevas áreas de expansión rural dispersa, indicando un fenómeno de urbanización rural incipiente. Este patrón de cambios es consistente con los procesos de transformación observados en otros páramos andinos, donde las presiones agrícolas y la expansión urbana informal son las principales amenazas a la conservación de ecosistemas (Buytaert et al., 2006)

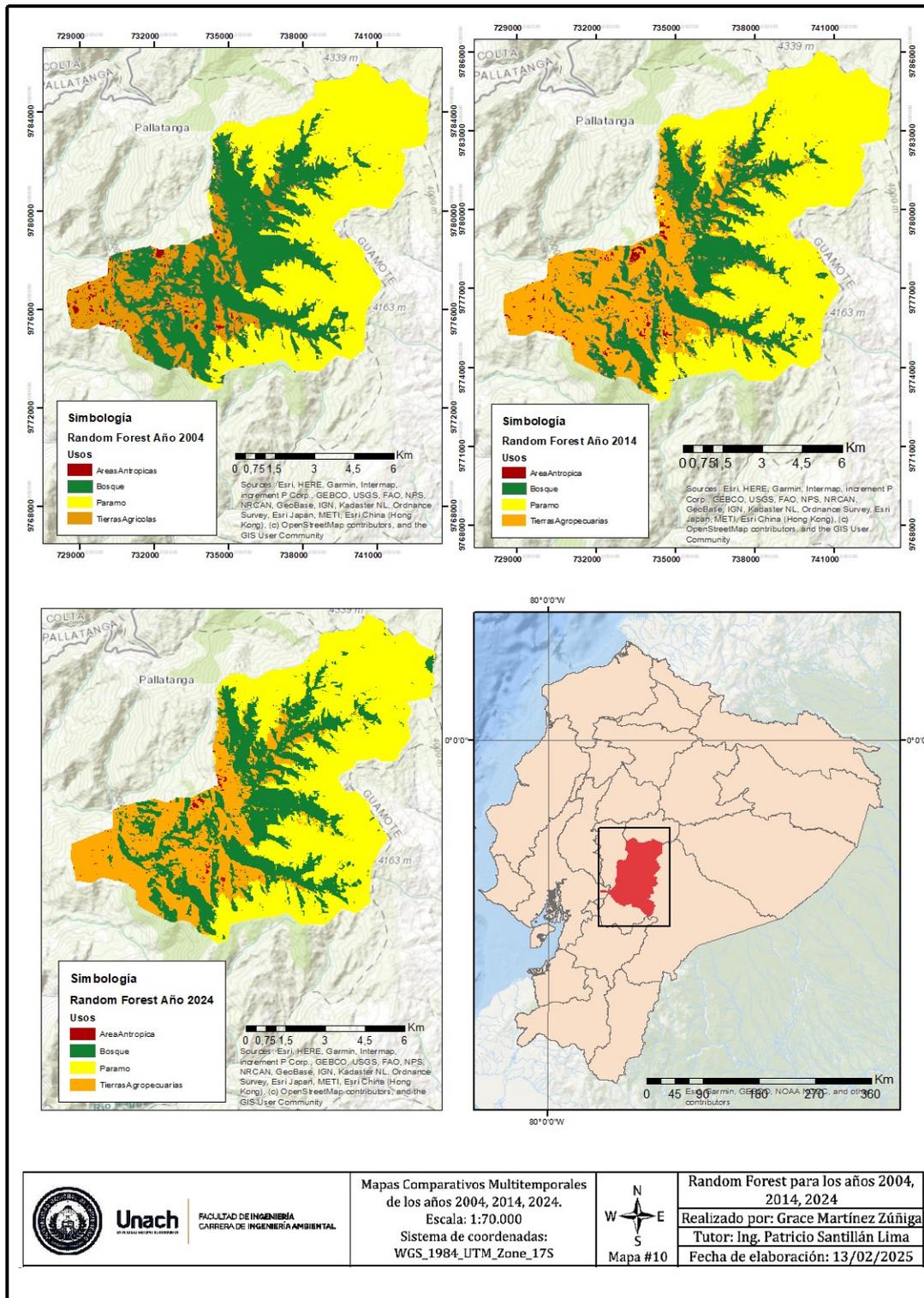
El análisis de cambios reveló tendencias preocupantes para la sostenibilidad ambiental de la microcuenca:

- El ecosistema de páramo, clave para la regulación hídrica y la biodiversidad altoandina, se encuentra en un estado de fragmentación avanzada y continua reducción.
- La tierra agropecuaria se consolidó como la matriz dominante del paisaje, lo cual implica mayores riesgos de degradación de suelos, pérdida de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad a desastres naturales. La transformación es más intensa en cotas elevadas, lo que confirma que el límite de expansión agrícola ha sobrepasado umbrales altitudinales críticos que tradicionalmente marcaban la frontera ecológica de los cultivos.
- La expansión de áreas antrópicas, aunque aún limitada en términos de superficie total, representa un fenómeno emergente que podría acelerar procesos de cambio en el futuro si no se implementan políticas de ordenamiento territorial adecuadas.

Estos hallazgos reflejan la necesidad urgente de estrategias de gestión integral de cuencas, restauración de ecosistemas de páramo y ordenamiento del territorio que consideren la conservación de los servicios ecosistémicos como prioridad (Tejedor Garavito et al., 2012).

**Figura 12**

*Mapas Comparativos Multitemporales de los años 2004, 2014, 2024*



*Nota:* La imagen presenta mapas del uso del suelo en la microcuenca del río Cocco para los años 2004, 2014 y 2024, clasificados con el algoritmo Random Forest. Se observan aumentos en las áreas agropecuarias y antrópicas, con reducción del bosque y páramo.

Además, el análisis espacial evidenció que las transformaciones territoriales son más intensas en zonas de acceso vial. Los corredores viales funcionan como ejes de expansión agrícola y antrópica, consolidando patrones de cambio espacial que siguen la infraestructura existente, lo cual concuerda con dinámicas observadas en otros territorios rurales andinos.

**Tabla 8**

*Tendencias multitemporales del suelo*

<b>Categoría de Uso de Suelo</b>	<b>Estado en 2004</b>	<b>Estado en 2014</b>	<b>Estado en 2024</b>	<b>Tendencia Principal Detectada</b>
Páramo	Dominaba grandes extensiones continuas en zonas altas (>3.200 msnm). Alta conectividad ecológica.	Reducción moderada, fragmentación inicial en zonas de altitud media.	Fragmentación avanzada, parches aislados. Reducción crítica de superficie.	Pérdida acelerada y fragmentación ecológica. Avance de frontera agrícola.
Bosque	Coberturas relativamente estables en sectores noroeste y zonas de pendiente alta.	Reducción leve, fragmentación en bordes.	Reducción moderada, remanentes en zonas inaccesibles.	Pérdida por apertura agrícola y periurbana. Vulnerabilidad en zonas marginales.
Tierra agropecuaria	Áreas concentradas en zonas bajas y medias de la cuenca.	Expansión hacia zonas de páramo degradado y bordes de bosque.	Expansión intensa hacia zonas altas. Dominio del mosaico agrícola.	Aceleración del cambio de uso de suelo agrícola. Intensificación productiva.
Área antrópica	Presencia puntual en	Ligero aumento en	Aumento de asentamientos	Urbanización rural incipiente y

núcleos poblados caminos rurales.	proximidades y de caminos principales.	dispersos zonas rurales.	en crecimiento informal.
---	--	-----------------------------	-----------------------------

## PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

### Uso de Suelo Páramo - Formación Alausí

#### pH

El pH de los suelos de la formación Alausí varió entre 5,91 y 7,08, abarcando desde condiciones ligeramente ácidas hasta neutras. En promedio, se registró un pH de 6,52, lo que indica un ambiente favorable para la disponibilidad de nutrientes esenciales como fósforo y potasio. Los valores más bajos estuvieron relacionados con la descomposición de materia orgánica y procesos de mineralización lenta, mientras que los valores cercanos a 7,08 sugieren una menor influencia de procesos ácidos como se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Valores de pH correspondientes a la formación Alausí en Páramo.*

ID	PH			PROMEDIO
	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	
FA_P01	6,41	6,73	6,6	6,58
FA_P02	6,69	6,45	6,56	6,56
FA_P03	6,1	5,78	5,85	5,91
FA_P04	6,23	6,32	6,03	6,19
FA_P05	6,46	6,39	6,28	6,37
FA_P06	6,47	6,8	6,63	6,63
FA_P07	7,34	7,18	6,72	7,08
FA_P08	6,3	6,2	6,35	6,28
FA_P09	6,95	6,78	6,77	6,83
FA_P10	6,43	6,59	6,59	6,53
FA_P11	6,68	6,68	6,83	6,73
FA_P12	6,8	6,82	6,91	6,84
FA_P13	6,55	6,48	6,58	6,53
FA_P14	6,5	6,51	6,5	6,50
FA_P15	6,44	6,48	6,45	6,45
FA_P16	6,62	6,27	6,28	6,39
FA_P17	6,11	6,07	6,29	6,15
FA_P18	6,42	6,44	6,28	6,38
FA_P19	6,11	6,52	6,39	6,34
FA_P20	6,27	6,46	6,46	6,39
FA_P21	6,55	6,45	6,51	6,50

FA_P22	6,52	6,64	6,47	6,54
FA_P23	6,35	6,48	6,36	6,39
FA_P24	6,7	6,45	6,56	6,57
FA_P25	6,39	6,96	6,46	6,60
FA_P26	6,75	7,04	6,5	6,76
FA_P27	6,96	6,43	6,54	6,64
FA_P28	6,7	6,21	6,5	6,47
FA_P29	6,59	6,8	6,04	6,47
FA_P30	6,56	7,02	6,71	6,76
<b>PROMEDIO</b>				<b>6,52</b>

*Nota:* Se puede concluir que la formación Alausí en Páramo indica un ambiente favorable para la disponibilidad de nutrientes esenciales. Valores más bajos están asociados con la descomposición de materia orgánica y procesos de mineralización lenta, mientras que los más altos sugieren menor influencia de procesos ácidos.

### **Conductividad**

Los valores de conductividad eléctrica oscilaron entre 24,0 y 192,67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 47,09  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que refleja una baja salinidad, característica de los suelos de páramo. Algunos valores elevados estuvieron asociados con la acumulación de sales debido a procesos de erosión, infiltración o actividad volcánica como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Valores de conductividad eléctrica correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo*

<b>CONDUCTIVIDAD</b>				
<b>ID</b>	<b>VALOR 1</b>	<b>VALOR 2</b>	<b>VALOR 3</b>	<b>PROMEDIO <math>\mu\text{S}/\text{CM}</math></b>
FA_P01	42	46	42	43,33
FA_P02	44	38	38	40,00
FA_P03	205	170	203	192,67
FA_P04	50	52	74	58,67
FA_P05	36	42	34	37,33
FA_P06	26	30	26	27,33
FA_P07	28	34	34	32,00
FA_P08	74	74	78	75,33
FA_P09	24	24	24	24,00
FA_P10	42	42	42	42,00
FA_P11	28	32	34	31,33
FA_P12	70	70	70	70,00
FA_P13	30	30	30	30,00
FA_P14	44	48	50	47,33
FA_P15	30	26	26	27,33

FA_P16	24	26	26	25,33
FA_P17	78	80	76	78,00
FA_P18	50	48	48	48,67
FA_P19	110	102	100	104,00
FA_P20	34	36	36	35,33
FA_P21	44	42	48	44,67
FA_P22	26	26	28	26,67
FA_P23	30	28	30	29,33
FA_P24	34	36	38	36,00
FA_P25	40	36	36	37,33
FA_P26	24	26	26	25,33
FA_P27	62	54	54	56,67
FA_P28	30	28	28	28,67
FA_P29	26	28	36	30,00
FA_P30	28	30	26	28,00
<b>PROMEDIO</b>			<b>47,09 <math>\mu\text{S/cm}</math></b>	

*Nota:* Los valores obtenidos reflejan una baja salinidad, típica de los suelos de páramo. Algunos incrementos pueden deberse a acumulación de sales por erosión, infiltración o actividad volcánica.

### Densidad Aparente

Los valores de densidad se muestran en la tabla 11, estos oscilaron entre 0,568 y 0,89 g/cm<sup>3</sup>, con un promedio de 0,73 g/cm<sup>3</sup>. Esto indica que los suelos son porosos y de baja compactación, facilitando la infiltración de agua y el intercambio de gases. Los valores más bajos sugieren suelos ricos en materia orgánica (Histosoles), mientras que los más altos están relacionados con suelos mineralizados o compactados por actividad humana o tránsito de ganado.

**Tabla 11**

*Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo*

<b>DENSIDAD APARENTE</b>				
<b>ID</b>	<b>PESO</b>	<b>SUELO HUMEDO</b>	<b>SUELO SECO</b>	<b>PROMEDIO</b>
	<b>RECIPIENTE VACIO</b>			
FA_P01	6,70	200,26	184,18	0,89
FA_P02	6,66	96,84	75,35	0,73
FA_P03	6,61	93,99	74,77	0,74

FA_P04	6,59	94,98	74,91	0,74
FA_P05	6,69	89,14	70,60	0,74
FA_P06	6,68	224,76	195,97	0,85
FA_P07	6,57	199,09	178,17	0,87
FA_P08	6,61	81,32	63,07	0,72
FA_P09	6,62	216,82	189,75	0,85
FA_P10	6,68	194,91	167,17	0,83
FA_P11	6,67	83,88	65,95	0,73
FA_P12	6,61	78,74	57,43	0,67
FA_P13	6,63	83,47	56,26	0,62
FA_P14	6,64	92,16	68,68	0,70
FA_P15	6,67	83,55	64,16	0,71
FA_P16	6,68	87,23	55,94	0,60
FA_P17	6,61	94,73	59,26	0,58
FA_P18	6,60	100,86	76,61	0,71
FA_P19	6,61	222,88	172,10	0,75
FA_P20	6,67	225,18	178,81	0,77
FA_P21	6,64	231,29	181,56	0,76
FA_P22	6,68	234,89	178,83	0,74
FA_P23	6,68	241,45	189,63	0,76
FA_P24	6,66	94,91	66,28	0,65
FA_P25	6,66	80,50	49,53	0,57
FA_P26	6,66	91,74	61,06	0,62
FA_P27	6,64	87,80	59,00	0,62
FA_P28	6,69	86,10	54,74	0,59
FA_P29	6,65	195,72	175,45	0,87
FA_P30	6,71	201,08	179,31	0,86
<b>PROMEDIO</b>				<b>0,73</b>

*Nota:* Según los valores obtenidos se puede deducir que el suelo es altamente poroso, favoreciendo la infiltración de agua y la actividad biológica.

## Humedad

El contenido de humedad varió entre 8,73% y 62,54%, con un promedio de 31,8%. Los valores altos indican suelos turbosos o saturados de agua, mientras que los bajos reflejan zonas erosionadas o con menor cobertura vegetal como se representa en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Valores de Humedad correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo*

<b>HUMEDAD</b>			
<b>ID</b>	<b>SUELO HUMEDO</b>	<b>SUELO SECO</b>	<b>PROMEDIO</b>
			<b>%</b>
FA_P01	200,26	184,18	8,73
FA_P02	96,84	75,35	28,53
FA_P03	93,99	74,77	25,71
FA_P04	94,98	74,91	26,79
FA_P05	89,14	70,60	26,26
FA_P06	224,76	195,97	14,69
FA_P07	199,09	178,17	11,74
FA_P08	81,32	63,07	28,92
FA_P09	216,82	189,75	14,27
FA_P10	194,91	167,17	16,59
FA_P11	83,88	65,95	27,19
FA_P12	78,74	57,43	37,10
FA_P13	83,47	56,26	48,38
FA_P14	92,16	68,68	34,19
FA_P15	83,55	64,16	30,23
FA_P16	87,23	55,94	55,93
FA_P17	94,73	59,26	59,84
FA_P18	100,86	76,61	31,65
FA_P19	222,88	172,10	29,50
FA_P20	225,18	178,81	25,93
FA_P21	231,29	181,56	27,39
FA_P22	234,89	178,83	31,35
FA_P23	241,45	189,63	27,33
FA_P24	94,91	66,28	43,20

FA_P25	80,50	49,53	62,54
FA_P26	91,74	61,06	50,26
FA_P27	87,80	59,00	48,82
FA_P28	86,10	54,74	57,29
FA_P29	195,72	175,45	11,55
FA_P30	201,08	179,31	12,14
<b>PROMEDIO</b>			<b>31,80%</b>

*Nota:* Los valores obtenidos indican una alta capacidad de retención de agua, crucial en estos ecosistemas.

### **Textura y color del suelo**

Los suelos fueron clasificados como franco-arenosos o franco-arcillosos, combinando buena infiltración de agua con retención de nutrientes. El color predominante fue marrón oscuro o negro, debido al alto contenido de materia orgánica. Tonalidades más claras indicaron menor acumulación de materia orgánica o erosiones.

### **Figura 13**

*Análisis de la textura del Suelo por el Método de sensibilidad del tacto (organoléptico) y prueba de manipulación.*



*Nota.* La imagen ilustra el método manual para determinar la textura del suelo, basado en la manipulación de una muestra humedecida. Los suelos presentan texturas franco-arenosas o franco-arcillosas, favoreciendo tanto la retención de agua como la infiltración. El color oscuro es indicativo de un alto contenido de materia orgánica.

### **Tipo de Suelo**

Se identificaron principalmente Histosoles, ricos en materia orgánica y alta retención de agua, y Andosoles, de origen volcánico, caracterizados por alta fertilidad y buena retención hídrica.

## Carbono Orgánico del Suelo

La tabla 13 muestra los datos recopilados de la formación Alausí en los páramos de Chimborazo. El promedio de carbono en el suelo fue de 205,76 mg C/kg, con un 7,77% de materia orgánica. Esto es característico de ecosistemas altoandinos, donde el frío y la humedad reducen la descomposición de materia orgánica.

**Tabla 13**

*Valores de Carbono Orgánico correspondientes al suelo de la Formación Alausí en Páramo*

REPETICIÓN # 1		REPETICIÓN # 2		REPETICIÓN #3	PROMEDIO
ID	%C	%C	%C	%C	%C.
FA_P01	9,28	9,32	9,46	9,35	
FA_P02	9,75	9,60	9,69	9,67	
FA_P03	9,77	9,83	9,77	9,79	
FA_P04	8,24	8,17	8,31	8,23	
FA_P05	8,21	8,10	8,15	8,15	
FA_P06	7,30	7,29	7,35	7,31	
FA_P07	10,53	10,47	10,30	10,43	
FA_P08	11,27	11,42	11,55	11,41	
FA_P09	7,48	7,48	7,73	7,56	
FA_P10	6,95	6,82	7,02	6,93	
FA_P11	11,30	11,26	11,16	11,23	
FA_P12	12,74	12,86	13,01	12,87	
FA_P13	12,40	12,63	12,26	12,43	
FA_P14	11,98	12,21	12,22	12,13	
FA_P15	8,75	8,65	8,71	8,70	
FA_P16	8,35	8,13	7,96	8,14	
FA_P17	8,19	8,15	8,29	8,21	
FA_P18	6,28	6,26	6,28	6,27	
FA_P19	8,14	8,15	8,31	8,20	
FA_P20	8,95	9,00	8,85	8,93	
FA_P21	8,96	9,09	8,87	8,97	
FA_P22	7,25	7,63	7,68	7,52	
FA_P23	8,43	8,53	8,38	8,44	
FA_P24	2,58	6,83	6,98	5,46	
FA_P25	12,38	12,39	12,53	12,43	
FA_P26	10,77	10,64	10,66	10,69	
FA_P27	10,17	10,27	10,29	10,24	
FA_P28	9,90	9,70	9,77	9,79	
FA_P29	8,16	8,01	8,05	8,07	
FA_P30	8,34	8,21	8,36	8,30	

*Nota:* El contenido de carbono orgánico es alto, reflejando una gran capacidad para almacenar carbono y regular la humedad, lo que es esencial para el mantenimiento del ecosistema del páramo.

## Uso de suelo Páramo - Formación Piñón

### pH del suelo

Los valores de pH oscilaron entre 6,41 y 6,85, con un promedio de 6,67, indicando suelos ligeramente ácidos a neutros, ideales para el desarrollo de cultivos y actividad biológica. Esto refleja una notable homogeneidad química en las áreas estudiadas como se muestra en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Valores de pH correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

PH				
ID	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	PROMEDIO
FP_P01	6,84	6,38	6,46	6,56
FP_P02	7,08	6,90	6,34	6,77
FP_P03	6,55	6,68	6,63	6,62
FP_P04	7,14	6,88	6,54	6,85
FP_P05	6,60	6,93	6,84	6,79
FP_P06	6,92	6,37	6,39	6,56
FP_P07	7,07	6,68	6,53	6,76
FP_P08	6,43	6,56	6,23	6,41
<b>PROMEDIO</b>			<b>6,67</b>	

*Nota:* El suelo presenta valores de pH ligeramente ácidos a neutros, condiciones favorables para el desarrollo biológico y el crecimiento vegetal.

### Conductividad

Los valores de conductividad eléctrica mostradas en la tabla 15 variaron entre 21,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 284,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 67,04  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Si bien en general los valores son bajos, característicos de ecosistemas de páramo, algunas muestras presentaron incrementos asociados a acumulaciones salinas locales.

**Tabla 15**

*Valores de Conductividad correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

CONDUCTIVIDAD				
ID	Valor 1	Valor 2	Valor 3	PROMEDIO $\mu\text{S}/\text{cm}$
FP_P01	26,00	26,00	28,00	26,67
FP_P02	30,00	28,00	28,00	28,67

FP_P03	22,00	22,00	24,00	22,67
FP_P04	76,00	98,00	100,00	91,33
FP_P05	30,00	34,00	34,00	32,67
FP_P06	30,00	28,00	28,00	28,67
FP_P07	287,00	283,00	283,00	284,33
FP_P08	20,00	20,00	24,00	21,33
<b>PROMEDIO</b>				<b>67,04 <math>\mu</math>S/cm</b>

*Nota:* Se presenta una conductividad generalmente baja, aunque en ciertas muestras se han detectado valores elevados debido a acumulaciones salinas locales.

### Densidad Aparente (Dap)

Para Dap se registraron valores entre 0,46 g/cm<sup>3</sup> y 0,78 g/cm<sup>3</sup>, con un promedio de 0,63 g/cm<sup>3</sup>, indicando suelos altamente porosos, típicos de ecosistemas de alta montaña. Estas características favorecen la infiltración de agua, aireación y actividad biológica cómo se presenta en la tabla 16.

### Tabla 16

*Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

<b>DENSIDAD APARENTE</b>					
<b>ID</b>	<b>PESO RECIPIENTE</b>		<b>SUELO</b>		<b>PROMEDIO</b>
	<b>VACÍO</b>	<b>HÚMEDO</b>	<b>SECO</b>		
FP_P01	6,76	112,20	81,48		0,68
FP_P02	6,70	148,77	96,74		0,62
FP_P03	6,73	109,17	69,70		0,60
FP_P04	6,66	101,54	84,13		0,78
FP_P05	6,73	95,01	76,49		0,75
FP_P06	6,65	98,00	59,54		0,57
FP_P07	6,68	199,09	94,22		0,46
FP_P08	6,85	93,25	58,38		0,58
<b>PROMEDIO</b>					<b>0,63</b>

*Nota:* Mediante los análisis se puede evidenciar que el suelo es altamente poroso, favoreciendo la infiltración de agua y la actividad biológica.

## Humedad

Los porcentajes de humedad oscilaron entre 20,69% y 111,30%, como se puede apreciar en la tabla 17 con un promedio general de 53,58%, lo que confirma una alta capacidad de retención de agua, esencial para la fertilidad en estas condiciones climáticas.

**Tabla 17**

*Valores de Humedad correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

<b>HUMEDAD</b>			
	<b>SUELO</b>	<b>SUELO</b>	
<b>ID</b>	<b>HÚMEDO</b>	<b>SECO</b>	<b>PROMEDIO%</b>
FP_P01	112,20	81,48	37,69
FP_P02	148,77	96,74	53,78
FP_P03	109,17	69,70	56,63
FP_P04	101,54	84,13	20,69
FP_P05	95,01	76,49	24,21
FP_P06	98,00	59,54	64,60
FP_P07	199,09	94,22	111,30
FP_P08	93,25	58,38	59,73
<b>PROMEDIO</b>			<b>53,58%</b>

*Nota:* Los valores obtenidos indican una alta capacidad de retención de agua, crucial en estos ecosistemas.

## Textura y color del suelo

Los suelos analizados presentan texturas moderadamente finas, clasificadas como arenosas francas, francas y arcillosas. En cuanto al color, predominan tonalidades oscuras, asociadas con alto contenido de materia orgánica y humedad cómo se presenta en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Tipo de suelo y textura correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

<b>SUELO</b>			
<b>ID</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>COLOR</b>
FP_P01	Moderadamente Fina	Arenoso Franco	10 YR 2/1
FP_P02	Moderadamente Fina	Arenoso Franco	7,5 YR 2,5/2
FP_P03	Moderadamente Fina	Arenoso Franco	10 YR 3/3

FP_P04	Moderadamente Fina	Arcilla	10 YR	2/2
FP_P05	Moderadamente Fina	Arcilla	10 YR	2/1
FP_P06	Moderadamente Fina	Arenoso Franco	7,5 YR	2,5/1
FP_P07	Moderadamente Fina	Franco	7,5 YR	2,5/2
FP_P08	Moderadamente Fina	Arenoso Franco	10 YR	2/1

*Nota:* Las texturas varían entre arenosas francas, francas y arcillosas. Predominan colores oscuros, lo que sugiere un alto contenido de materia orgánica y humedad.

### **Carbono Orgánico del Suelo**

En la tabla 19 se muestran resultados de la formación Piñón la cual registra valores entre 102,674 mg C/kg y 241,592 mg C/kg de carbono y entre 6,129% y 8,951% de materia orgánica, destacándose por su capacidad de almacenamiento de carbono y regulación hídrica. Aunque el contenido de carbono es menor que en la formación Alausí (tabla 13), el porcentaje de materia orgánica es superior, posiblemente debido a condiciones locales más favorables para la acumulación y conservación de materia orgánica.

**Tabla 19**

*Valores de Carbono correspondientes al suelo de la Formación Piñón en Páramo*

ID	REPETICIÓN # 1	REPETICIÓN # 2	REPETICIÓN #3	PROMEDIO
	%C	%C	%C	%C.
FP_P01	10,31	10,37	10,59	10,42
FP_P02	10,12	10,23	10,63	10,33
FP_P03	9,11	9,13	9,11	9,12
FP_P04	10,21	10,25	10,35	10,27
FP_P05	10,06	10,11	10,11	10,09
FP_P06	10,29	10,20	10,27	10,25
FP_P07	7,06	7,12	7,32	7,17
FP_P08	10,27	10,60	10,59	10,49

*Nota:* Se puede evidenciar que el suelo almacena una cantidad significativa de carbono orgánico. Aunque su contenido total es menor en comparación con la formación Alausí, el porcentaje de materia orgánica es más alto, lo que indica condiciones favorables para su acumulación.

## Uso de Suelo Cultivo

En el marco del análisis de las muestras de suelo tomadas de la zona baja de cultivos en la microcuenca del río Coco, en Pallatanga, se determinaron los siguientes resultados:

### pH

Como se observa en la Tabla 20, los valores de pH oscilaron entre 5,34 y 7,39, con un promedio general de 6,25. Esto indica que los suelos de la zona presentan condiciones ligeramente ácidas, lo cual es favorable para la mayoría de los cultivos, aunque en algunas áreas específicas podría ser necesario realizar ajustes para optimizar la disponibilidad de nutrientes.

**Tabla 20**

*Valores de pH correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo*

PH				
ID	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	PROMEDIO
C_P01	5,34	5,44	5,87	5,55
C_P02	5,84	5,63	5,73	5,73
C_P03	7,39	7,1	7,12	7,20
C_P04	6,52	6,5	6,51	6,51
C_P05	6,24	6,28	6,28	6,27
PROMEDIO TOTAL				6,25

*Nota:* Los valores indican suelos ligeramente ácidos, lo cual es beneficioso para la mayoría de los cultivos. Sin embargo, en algunas zonas podrían requerirse ajustes para optimizar la disponibilidad de nutrientes.

### Conductividad

De acuerdo con la Tabla 21, los valores promedio de conductividad eléctrica estuvieron entre 363,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 552,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio total de 479,40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos resultados reflejan niveles de salinidad manejables en los suelos de la zona, adecuados para una amplia gama de cultivos agrícolas.

**Tabla 21**

*Valores de Conductividad correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo*

CONDUCTIVIDAD				
ID	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	PROMEDIO $\mu\text{S}/\text{cm}$
C_P01	540	580	536	552,00

C_P02	480	500	496	492,00
C_P03	357	363	369	363,00
C_P04	556	556	518	543,33
C_P05	430	460	450	446,67
<b>PROMEDIO TOTAL</b>			<b>479,40 <math>\mu\text{S/cm}</math></b>	

*Nota:* Los niveles de salinidad son adecuados para la actividad agrícola, permitiendo el crecimiento de una amplia variedad de cultivos.

### Densidad aparente

Los valores promedio de densidad aparente, reportados en la Tabla 22, se encontraron entre 0,45 g/cm<sup>3</sup> y 0,81 g/cm<sup>3</sup>, con un promedio general de 0,70 g/cm<sup>3</sup>. Esto indica que los suelos son mayormente sueltos, lo cual favorece la porosidad, el desarrollo radicular y la infiltración de agua.

**Tabla 22**

*Valores de Densidad Aparente correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo*

<b>DENSIDAD APARENTE</b>				
<b>ID</b>	<b>PESO RECIPIENTE VACIO</b>	<b>SUELO HUMEDO</b>	<b>SUELO SECO</b>	<b>PROMEDIO g/cm<sup>3</sup></b>
C_P01	6,624	164,99	125,069	0,73
C_P02	6,118	116,442	88,278	0,72
C_P03	6,025	174,842	144,068	0,80
C_P04	6,064	116,648	99,909	0,81
C_P05	6,673	114,636	54,365	0,45
<b>PROMEDIO TOTAL</b>			<b>0,70</b>	

*Nota:* Los suelos son sueltos y bien aireados, lo que facilita la penetración de las raíces y la infiltración del agua.

### Humedad del suelo

Como se detalla en la Tabla 23, los niveles de humedad variaron ampliamente, desde valores bajos de 16,75% hasta un máximo de 110,86%, con un promedio general de 42,56%. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en la textura del suelo y las características de drenaje de las distintas áreas de la zona estudiada.

**Tabla 23***Valores de Humedad correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo*

<b>HUMEDAD</b>			
<b>ID</b>	<b>SUELO HUMEDO</b>	<b>SUELO SECO</b>	<b>PROMEDIO</b>
C_P01	164,99	125,069	31,92
C_P02	116,442	88,278	31,90
C_P03	174,842	144,068	21,36
C_P04	116,648	99,909	16,75
C_P05	114,636	54,365	110,86
<b>PROMEDIO TOTAL</b>			<b>42,56</b>

*Nota:* Los valores de humedad presentan variabilidad, lo que puede reflejar diferencias en la textura y las condiciones de drenaje de cada área.

**Textura, tipo y color del suelo**

De acuerdo con la Tabla 24, la textura predominante en las muestras se clasificó como moderadamente fina, con un tipo de suelo identificado como arenoso franco. Este tipo de suelo es ideal para el cultivo, ya que combina una buena capacidad de retención de nutrientes con un drenaje eficiente. Los colores variaron de tonos oscuros a claros, indicando diferencias en contenido de materia orgánica y composición mineral.

**Tabla 24***Tipo de Suelo, Textura y Color correspondientes a la zona baja de Cultivo*

<b>SUELO</b>				
<b>ID</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>COLOR</b>	
C_P01	MODERADAMENTE FINA	ARENOSO FRANCO	7,5 YR	2,5/1
C_P02	MODERADAMENTE FINA	ARENOSO FRANCO	7,5 YR	3/4
C_P03	MODERADAMENTE FINA	ARENA	10 YR	6/3
C_P04	MODERADAMENTE FINA	ARENOSO FRANCO	7,5 YR	3/3
C_P05	MODERADAMENTE FINA	ARENOSO FRANCO	7,5 YR	3/4

*Nota:* La textura predominante es arenoso franco, combinando buena retención de nutrientes con drenaje eficiente. Las variaciones de color reflejan diferencias en la cantidad de materia orgánica y la composición mineral del suelo.

## Carbono Orgánico del suelo

Los resultados presentados en la tabla 25 muestran que el porcentaje de materia orgánica del suelo (%MOS) varía entre 4,45% y 6,99%, con un promedio general de 5,43%, lo que refleja niveles moderados en términos generales, aunque con una variabilidad notable entre las muestras. La muestra C\_P05 destaca por tener el mayor contenido de %MOS (6,99%), lo que sugiere una mejor capacidad del suelo para retener nutrientes y agua. En contraste, la muestra C\_P02 presentó el valor más bajo (4,45%), lo que podría indicar ciertas limitaciones en la fertilidad del suelo.

**Tabla 25**

*Valores de Carbono Orgánico correspondientes al suelo de la zona baja de Cultivo*

ID	Repetición # 1	Repetición # 2	Repetición #3	Promedio %C.
	%C	%C	%C	
C_P01	6,13	6,11	6,15	6,13
C_P02	5,40	5,48	5,43	5,44
C_P03	5,69	5,64	5,61	5,65
C_P04	7,99	8,17	8,24	8,13
C_P05	6,17	12,34	6,01	8,18

*Nota:* El contenido de materia orgánica varía entre valores bajos y moderados, lo que influye en la fertilidad del suelo. Las zonas con menor porcentaje podrían beneficiarse de prácticas como la aplicación de abonos orgánicos para mejorar su productividad.

## Distribución del Carbono Orgánico contenido en la microcuenca del Río Coco según Uso del Suelo

En esta microcuenca, las formaciones de páramo Piñón y Alausí son las más destacadas, junto con áreas dedicadas al cultivo, tanto en zonas específicas como dentro de las formaciones de páramo. Los niveles de carbono orgánico en el suelo varían considerablemente, siendo más altos en las áreas de páramo, particularmente en la formación Alausí, y más bajos en las zonas destinadas a la agricultura. Esta discrepancia evidencia la habilidad de los ecosistemas de páramo para acumular carbono, lo que los sitúa como socios esenciales en la reducción del calentamiento global. Entender esta variabilidad facilita una mejor comprensión de la dinámica del suelo dependiendo del tipo de cobertura y el uso que se le da, proporcionando datos útiles para la conservación, la organización territorial y la gestión sostenible de los recursos naturales en la microcuenca del río Coco.



### **Estimación del valor económico del carbono orgánico como servicio ecosistémico.**

La estimación del valor económico del carbono orgánico almacenado en los suelos de la microcuenca del río Coco se basa en el contenido de carbono edáfico determinado en cada una de las formaciones geológicas predominantes. Este análisis permite evaluar la contribución del ecosistema a la mitigación del cambio climático y su potencial de aprovechamiento en mercados de carbono.

El reconocimiento del valor económico del carbono almacenado en los suelos de la microcuenca del río Coco tiene implicaciones cruciales en la formulación de estrategias de conservación y gestión sostenible del suelo. La alteración de los usos del suelo, la expansión agrícola intensiva y la deforestación pueden reducir la capacidad de captura de carbono, afectando su función como sumideros naturales de CO<sub>2</sub> y contribuyendo a un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los suelos de la microcuenca del río Coco presentan una considerable variabilidad en su capacidad de almacenamiento de carbono, determinada por factores como la composición del suelo, la presencia de materia orgánica y la profundidad de acumulación de carbono. Los datos obtenidos indican que la formación Alausí posee la mayor capacidad de retención de carbono, alcanzando un valor de 96,74 MgC/ha, seguida por la formación Piñón con 90,92 Mg/ha, mientras que Cultivo muestra la menor capacidad, con 66,94 MgC/ha. Estas diferencias reflejan la influencia de factores ambientales y la intervención antrópica en la estabilidad del carbono del suelo.

En términos de distribución espacial, la formación Alausí ocupa el 73,85% del área total analizada, mientras que la formación Piñón representa el 4,23% y Cultivo el 21,92%. Para estimar el contenido de carbono en términos de CO<sub>2</sub>, se aplicó la relación estequiométrica entre carbono y dióxido de carbono, considerando una profundidad media de 30 cm y utilizando un factor de conversión basado en la relación 44/12 de CO<sub>2</sub>/C. De acuerdo con estos parámetros, se determinaron los valores de carbono expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea para cada formación geológica: 358 tonCO<sub>2</sub>/ha para la formación Alausí, 330 tonCO<sub>2</sub>/ha para la formación Piñón y 250 tonCO<sub>2</sub>/ha para Cultivo.

Para determinar el valor económico del carbono almacenado en los suelos de la microcuenca, se ha tomado como referencia el precio del carbono en mercados internacionales. La valoración se basa en un precio referencia de 5 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>, misma estimación que se obtiene del Banco Mundial, además, el cual ha sido adoptado considerando estudios previos y tendencias del mercado voluntario de carbono en América Latina y el Caribe, dependiendo del tipo de proyecto, certificación y mecanismo de

compensación. En países como Colombia y México, los precios en mercados voluntarios oscilan entre 5 y 10 USD por tonelada en proyectos de conservación y reforestación. En contraste, en el mercado regulado de la Unión Europea, los precios pueden superar los 20 USD por tonelada, aunque bajo esquemas más estrictos de certificación y cumplimiento normativo. Este valor de referencia al cual nos delimitamos se encuentra dentro del rango observado en diversos mecanismos de compensación de emisiones, asegurando una estimación prudente y fundamentada en la realidad económica del sector.

La valoración económica del contenido de carbono se calculó por medio del método de costo de daño evitado a nivel mundial por la mitigación del cambio climático (Castro, 2011b). Considerando un costo social de carbono de 5 USD/tonCO<sub>2</sub>, se puede visualizar que el valor económico más alto corresponde a los suelos ubicados en la formación Alausí, que representan 6,58 millones de dólares americanos, lo que se atribuye a su elevada capacidad de almacenamiento de carbono (358 tonCO<sub>2</sub>/ha). La formación Piñón presenta un valor de 0,35 millones de dólares con una capacidad de 330 tonCO<sub>2</sub>/ha. En contraste, los suelos de Cultivo, caracterizados por una mayor intervención antrópica, muestran una reducción significativa en la capacidad de retención de carbono, acumulando solo 250 tonCO<sub>2</sub>/ha, lo que equivale a 1,36 millones de dólares. Estas cifras detalladas en la Tabla # reflejan la disminución del potencial de almacenamiento de carbono conforme aumenta la transformación del paisaje natural en suelos de uso agrícola.

**Tabla 26**

*Valor económico de CO de las diferentes formaciones geológicas*

Uso de Suelo	Formación Geológica	Mg/ha	Área (ha)	% de área	% Carbono orgánico	Carbono (tonCO <sub>2</sub> /ha)	Precio en \$ millones* / ha	Promedio
<b>Páramo</b>	Formación Alausí	96,74	3675,46	73,85	4,47	358	6,58	8,29
	Formación Piñón	90,92	210,55	4,23	4,75	330	0,35	
<b>Cultivo</b>	Cultivo	66,94	1090,65	21,92	3,24	250	1,36	
			4976,66					

En esta línea, podemos hacer un enfoque más detallado al uso de suelo, donde tomamos los valores de la formación de Alausí y formación de Piñón para tener valores del

uso de suelo denominado "Páramo". Podemos analizar que esta conformación representa una superficie total de 3886,01 ha, con un contenido promedio de 688 tonCO<sub>2</sub>/ha. En términos de valoración económica, esto equivale a 6,92 millones de dólares americanos, lo que resalta la importancia de estos ecosistemas en la captura y almacenamiento de carbono. Esta alta capacidad de acumulación de carbono se debe a las condiciones ambientales de los páramos, donde las bajas temperaturas y la elevada humedad reducen la descomposición de la materia orgánica, favoreciendo el secuestro de carbono a largo plazo.

**Tabla 27**

*Valor económico de CO correspondiente a Páramo*

Uso de Suelo	Área	% de área	Mg/ha	% Carbono orgánico	Carbono (tonCO <sub>2</sub> /ha)	Precio en millones*ton CO <sub>2</sub> / ha
<b>PÁRAMO</b>	3886,01	78,08	187,67	9,22	688	6,92

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2014) enfatiza la importancia de la valoración económica del almacenamiento de carbono como una estrategia costo-efectiva para la conservación de ecosistemas y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, la integración de estos resultados en mercados de carbono puede fortalecer las estrategias de conservación de suelos con alto contenido de carbono, garantizando la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos que ofrece la microcuenca del río Coco.

Ante este contexto, estos resultados respaldan la implementación de medidas de manejo sostenible del suelo, promoviendo la conservación del páramo y las áreas forestales con alta capacidad de retención de carbono. La cuantificación y valoración del carbono orgánico facilita el acceso a mecanismos de financiamiento ambiental, permitiendo la participación en mercados de carbono.

## **4.2 DISCUSIÓN**

El análisis evidenció que, durante el periodo estudiado, se produjo una expansión progresiva de la tierra agropecuaria, a expensas de la cobertura natural, especialmente del ecosistema de páramo. En 2004, la superficie destinada a actividades agropecuarias correspondía al 14,25% del área total de la microcuenca. Para 2014, este porcentaje había aumentado a 25,12%, manteniéndose elevado en 2024, con un 24,33%. Esta tendencia muestra que la frontera agrícola ha avanzado sostenidamente hacia zonas de mayor altitud,

zonas que tradicionalmente funcionaban como barreras naturales debido a sus condiciones edafoclimáticas adversas.

La expansión agrícola no solo afectó la cantidad de superficie natural, sino también la estructura del paisaje. La cobertura de páramo, pese a mostrar una leve recuperación entre 2004 y 2014, sufrió una pérdida neta hacia 2024, descendiendo a 48,45% de la superficie total. Este comportamiento no implica únicamente una disminución de área, sino un debilitamiento funcional del ecosistema, dado que la fragmentación genera parches cada vez más pequeños, menos eficientes en capturar y regular el agua y más vulnerables a alteraciones ambientales.

En cuanto al bosque, se registró una pérdida continua en las dos décadas analizadas, asociada tanto a procesos de expansión agrícola como a la aparición de áreas antrópicas. Los sectores de bosque remanente tienden a concentrarse en zonas más inaccesibles o de pendiente fuerte, donde las actividades agrícolas aún no han logrado establecerse de manera intensiva. El crecimiento de áreas antrópicas en la microcuenca fue más modesto en términos absolutos, pero no por ello irrelevante. Aunque la superficie ocupada por infraestructura y asentamientos humanos no superó el 1% en ninguno de los periodos, se evidenció la aparición de nuevos focos de expansión rural dispersa. Estas pequeñas áreas antrópicas tienden a funcionar como centros de transformación del paisaje, introduciendo infraestructura vial, actividades extractivas y presión sobre los recursos naturales adyacentes.

La metodología implementada, combinando preprocesamiento de imágenes en Google Earth Engine, cálculo de índices espectrales, clasificación supervisada mediante Random Forest y validación interna y externa con matrices de confusión, demostró ser altamente efectiva para detectar cambios de cobertura de manera precisa. La alta precisión global obtenida en todos los años clasificados respalda la fiabilidad de los resultados, permitiendo una interpretación confiable de las dinámicas espaciales y temporales de la microcuenca. Además, el procesamiento posterior en ArcGIS, mediante la reclasificación y transformación de ráster a polígonos, permitió cuantificar con gran detalle la superficie ocupada por cada uso de suelo, calcular tasas de cambio y generar mapas comparativos que ilustran visualmente la magnitud de las transformaciones.

En cuanto a las propiedades físico químicas, los resultados obtenidos permiten afirmar que el ecosistema de páramo, considerado uno de los principales reguladores hídricos de los Andes y sumidero natural de carbono, está siendo sometido a un proceso de transformación gradual pero continuo. Aunque el cambio porcentual anual puede parecer

bajo, su acumulación en el tiempo genera impactos ecológicos de gran magnitud, afectando no solo la biodiversidad y el funcionamiento ecosistémico, sino también los servicios que de ellos dependen las comunidades humanas, como el suministro de agua y la mitigación de eventos extremos. En este contexto, los patrones de cambio observados en la microcuenca del río Coco coinciden con los procesos de transformación reportados para otros páramos andinos, donde la presión agrícola y la expansión urbana informal han sido identificados como las principales amenazas a la integridad ecológica de estos ecosistemas.

El análisis realizado demuestra que los procesos de cambio de uso de suelo no solo son medibles, sino también predecibles, y que su monitoreo periódico es fundamental para orientar políticas públicas que garanticen la conservación de los servicios ecosistémicos y el bienestar de las poblaciones rurales que dependen de ellos.

En los suelos bajo páramo se observaron propiedades típicas de ecosistemas de alta montaña que desempeñan funciones críticas en el ciclo hidrológico y en el secuestro de carbono. La densidad aparente fue baja, reflejando una alta porosidad que permite la retención de agua, la infiltración y el adecuado intercambio de gases. Esta estructura suelta es esencial para la estabilidad de los suelos de páramo, ya que favorece la acumulación de materia orgánica y minimiza los procesos erosivos. A nivel químico, los suelos de páramo presentaron elevados contenidos de materia orgánica, fundamentales para su función como sumideros de carbono a largo plazo. Esta alta concentración de carbono es resultado de condiciones ambientales que reducen las tasas de descomposición de la materia orgánica, como bajas temperaturas, alta humedad y limitada actividad microbiana, factores que han sido ampliamente reconocidos en estudios de suelos de alta montaña (Farley et al., 2011).

Asimismo, el pH ácido de los suelos conservados, en un rango de aproximadamente 4,8 a 5,6, corresponde a las características típicas de los ecosistemas andinos. Este pH contribuye a la conservación de la materia orgánica y ralentiza los procesos de mineralización, ayudando a que el carbono permanezca almacenado en el suelo por periodos prolongados. La textura franco-arenosa observada en estos suelos proporciona un equilibrio ideal entre retención de agua y drenaje, aspectos clave para sostener la vegetación natural del páramo y regular la disponibilidad de agua para las zonas bajas de la cuenca durante todo el año.

En contraste, los suelos transformados para uso agropecuario presentaron una modificación notable de sus propiedades originales. Se registró un incremento en la densidad aparente, con valores superiores a 1,0 g/cm<sup>3</sup>, indicando procesos de compactación asociados al laboreo mecánico, la reducción de cobertura vegetal. Esta compactación disminuye la

porosidad del suelo, afectando negativamente la infiltración de agua y el desarrollo radicular, lo que a su vez incrementa la susceptibilidad a la erosión. En términos químicos, los suelos agrícolas mostraron una reducción considerable en el contenido de materia orgánica, consecuencia directa de la extracción continua de nutrientes, la falta de aportes orgánicos y el aumento de la mineralización acelerada por las prácticas de manejo intensivo.

El impacto de la transformación del uso de suelo se extiende también a la alteración del pH. En los suelos agrícolas, aunque el pH se mantuvo dentro de rangos ácidos, se detectó una tendencia a valores ligeramente más neutros. Esta modificación puede atribuirse al uso de fertilizantes y enmiendas químicas, que cambian la dinámica del suelo, alteran su capacidad de retención de nutrientes y afectan la actividad microbiana. Estas alteraciones físico-químicas reducen la capacidad del suelo para mantener sus funciones ecológicas esenciales, comprometiendo su rol como almacén de carbono y su capacidad de regular el ciclo del agua.

Estos hallazgos son de especial relevancia si se considera que los suelos de páramo son altamente vulnerables. La pérdida de carbono del suelo no solo implica una degradación local de la calidad edáfica, sino que contribuye a la liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera, agravando el cambio climático. Además, al perder estructura y materia orgánica, los suelos se vuelven menos resilientes frente a eventos climáticos extremos, aumentando los riesgos de erosión, pérdida de fertilidad y desertificación, como también se ha documentado en otros páramos andinos (Buytaert et al., 2006).

En este contexto, la investigación también se enfocó en cuantificar y valorar económicamente el carbono orgánico almacenado en los suelos de páramo de la microcuenca del río Coco. Este proceso permitió no solo evidenciar la importancia ecológica de los suelos altoandinos como sumideros de carbono, sino también otorgar un valor monetario tangible a este servicio ecosistémico, reforzando la argumentación a favor de su conservación desde una perspectiva económica.

Los resultados demostraron que los suelos de páramo almacenan cantidades considerables de carbono por unidad de área, debido principalmente a sus condiciones físico-químicas específicas. Esta capacidad de almacenamiento convierte a los suelos de páramo en uno de los reservorios naturales de carbono más importantes en las regiones tropicales de alta montaña. A partir de los valores de carbono orgánico detectados y utilizando precios internacionales de mercado de carbono, se realizó la estimación del valor económico del carbono almacenado, mostrando cifras significativas que permiten visualizar al páramo como un activo ambiental estratégico.

La valoración económica del carbono orgánico cobra especial relevancia en el contexto actual de cambio climático, donde los mecanismos de mercado y las políticas de compensación por servicios ecosistémicos están ganando terreno como instrumentos para incentivar la conservación. Tradicionalmente, la importancia de los páramos ha sido reconocida desde una perspectiva ecológica o hidrológica, pero traducir sus funciones ecosistémicas a términos económicos abre nuevas posibilidades para su gestión, permitiendo integrar su protección en esquemas financieros sostenibles como los pagos por servicios ambientales (Farley et al., 2011).

Sin embargo, este potencial económico está amenazado por las dinámicas de cambio de uso de suelo detectadas en la microcuenca. La conversión de suelos de páramo a tierras agrícolas no solo implica la pérdida directa de biodiversidad y servicios hidrológicos, sino que también significa la liberación a la atmósfera del carbono almacenado durante siglos en el suelo, contribuyendo activamente al calentamiento global. Este proceso representa un doble costo: se pierde un servicio ecosistémico esencial y se incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, exacerbando los efectos del cambio climático tanto a nivel local como global.

Además, debe considerarse que la pérdida de carbono del suelo no es fácilmente reversible. La restauración de suelos degradados y la recuperación de su capacidad de almacenamiento de carbono requieren tiempos ecológicos prolongados y fuertes inversiones económicas, sin garantía de alcanzar nuevamente los niveles originales de funcionalidad (Buytaert et al., 2006). Por ello, la conservación de los suelos de páramo debe ser priorizada no solo desde el punto de vista de la biodiversidad o del recurso hídrico, sino también como una estrategia efectiva y económica para la mitigación del cambio climático.

El estudio realizado confirma que incorporar la valoración económica del carbono en las políticas de planificación y conservación puede fortalecer los argumentos a favor de la protección de los páramos. Esta herramienta permite evidenciar que la conservación de estos ecosistemas no es solo una cuestión ética o ambiental, sino también una decisión racional y económicamente fundamentada. Invertir en la conservación de suelos de páramo significa proteger una infraestructura natural invaluable, que proporciona servicios esenciales a bajo costo y con beneficios de largo plazo para las sociedades locales y el planeta.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

La evaluación multitemporal de los años 2004, 2014 y 2024 permitió evidenciar transformaciones significativas en el uso y cobertura del suelo dentro de la microcuenca del río Coco, donde el ecosistema de páramo ha sido progresivamente sustituido por áreas de cultivo y actividades agropecuarias. Esta expansión de la frontera agrícola ha sido uno de los principales factores del cambio, marcando una tendencia preocupante hacia la degradación y fragmentación del ecosistema altoandino. A través del uso de imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2, combinadas con la clasificación supervisada mediante Random Forest y el análisis de índices espectrales (NDVI, NDWI), se logró mapear y cuantificar con precisión las áreas de pérdida de páramo y el crecimiento de zonas agrícolas.

Los resultados demuestran que entre 2004 y 2024 se ha registrado una disminución considerable en la cobertura de páramo, especialmente en altitudes medias donde las condiciones son más aptas para la agricultura. Este patrón revela la urgencia de implementar estrategias de conservación y ordenamiento territorial que limiten el avance de la frontera agrícola, fomenten la restauración de zonas degradadas y promuevan alternativas de producción sostenibles que no comprometan las funciones ecológicas del páramo, como la regulación hídrica y la captura de carbono.

El análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo permitió caracterizar en profundidad el estado del ecosistema de páramo en comparación con áreas de uso agrícola dentro de la microcuenca del río Coco. Se evidenció que los suelos del páramo presentan condiciones favorables para la acumulación de carbono orgánico, con valores elevados de humedad, baja densidad aparente y un pH ligeramente ácido, lo cual favorece la estabilidad de la materia orgánica. En contraste, los suelos dedicados al cultivo mostraron un deterioro notable en estos atributos: menor contenido de humedad, mayor densidad aparente y pH más alterado, lo que implica un mayor nivel de degradación estructural y pérdida de fertilidad.

Estos resultados confirman que las prácticas agrícolas intensivas y la intervención antrópica comprometen la integridad del suelo, reduciendo su capacidad de funcionar como sumidero de carbono y como proveedor de servicios ecosistémicos. La información generada sobre las características edáficas del páramo resulta esencial no solo para comprender los impactos del cambio de uso de suelo, sino también para diseñar estrategias de manejo adaptadas a las particularidades del ecosistema, que integren criterios de conservación, resiliencia climática y recuperación de suelos degradados.

La cuantificación del carbono orgánico presente en los suelos de la microcuenca del río Coco, junto con su valoración económica basada en el mercado voluntario de carbono, permitió destacar el aporte estratégico de este ecosistema en términos de mitigación del cambio climático. El estudio evidenció que los suelos de páramo, especialmente aquellos asociados a las formaciones geológicas Alausí y Piñón, poseen una alta capacidad de almacenamiento de carbono, con valores significativamente superiores a los encontrados en suelos agrícolas. La estimación económica del carbono orgánico almacenado en el ecosistema de páramo alcanza aproximadamente 6,92 millones de dólares, lo que resalta el potencial de este recurso como activo ambiental y financiero.

Esta valorización constituye un argumento claro para la conservación y la adecuada administración del servicio. Además, la dimensión económica aporta un enfoque integrador entre la ecología y la planificación territorial, permitiendo que las decisiones en torno al uso del suelo consideren no solo los beneficios productivos de corto plazo, sino también los valores ambientales de largo plazo asociados a la funcionalidad del ecosistema. Así, se ratifica que conservar el páramo no solo es una necesidad ecológica, sino también una oportunidad de desarrollo sostenible.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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).
- Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 114, pp. 24–31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- 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(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- 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>
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017a). Carbono almacenado en páramo andino. *ENTRAMADO*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Castellanos-Navarrete, A. (2013). *Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*.
- Castro, M. (2011a). *Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos*.
- Castro, M. (2011b). *una\_valoracion\_economica\_en\_bofedales\_del\_paramo*.
- Castro Méndez, C. E., Geográfico, I., & Codazzi, A. (2018). *Tabla Munsell Teoría y práctica" y "Manejo de Tabla de colores Munsell y régimen de Humedad*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19472.05125>
- 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.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Cohen, J. (1960). *A COEFFICIENT OF AGREEMENT FOR NOMINAL SCALES I*.

- Congalton, R. G. (1991). *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data* (Vol. 37).
- Congalton R, & Green K. (2008). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices Second Edition*.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- EUROCLIMA. (2022). *ES-sintesis-politica-valeco-A*.
- European Space Agency (ESA). (2022). *Sentinel-2 User Handbook*. .
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*.
- FAO. (2022). *Servicios culturales*.
- FARLEY, K. A., ANDERSON, W. G., BREMER, L. L., & HARDEN, C. P. (2011). Compensation for ecosystem services: an evaluation of efforts to achieve conservation and development in Ecuadorian páramo grasslands. *Environmental Conservation*, 38(4), 393–405. <https://doi.org/10.1017/S037689291100049X>
- Foody, G. M. (2002). *Status of land cover classification accuracy assessment*. [www.elsevier.com/locate/rse](http://www.elsevier.com/locate/rse)
- García, V., Márquez, C., Isenhardt, T., Rodríguez, M., Crespo, S., & Cifuentes, A. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- GOBIERNO AUTONOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DE PALLATANGA ADMINISTRACIÓN 2019 – 2023. (2021). *PDYOT PALLATANGA*.
- Gómez, S., Pino Vargas, E., Huayna Felipe, G., Espinoza Molina, J. L., Acosta Caipa, K. Y., & Cabrera Olivera, F. C. (2024). Machine Learning para la Clasificación y Análisis de los Índices de Biomasa y su relación con el Cambio Climático, Desierto de Atacama. *Manglar*, 21(1), 95–106. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.010>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hansen M, Potapov P, Moore R, Hancher M, Turubanova S, Tyukavina A, Thau D, Stehman S, Goetz S, Loveland T, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C, & Townshend

- R. (2013). Dosage compensation via transposable element mediated rewiring of a regulatory network. *Science*, 342(6160), 846–850. <https://doi.org/10.1126/science.1239552>
- Hernán, P. :, & Orjuela, B. (2010). *EL SUELO AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD Y SU ROL EN EL CONTEXTO DE LOS CAMBIOS GLOBALES: Vol. XI* (Issue 2).
- Hofstede, R., Mena, P., & Suárez, E. (2023). *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*.
- Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5), 778–782. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2681128>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *This content downloaded from 128.230.234.162 on Fri* (Vol. 33, Issue 1).
- López-Ulloa, M., Veldkamp, E., & de Koning, G. H. J. (2005). Soil Carbon Stabilization in Converted Tropical Pastures and Forests Depends on Soil Type. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1110–1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0353>
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. In *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 28, Issue 5, pp. 823–870). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Luis, J., Fernández, F., Maikel, A., Puebla, R., & Medel, H. B. (2020). RNPS: 2148 Revista Cubana de Ciencias Forestales. In *enero-abril* (Vol. 8, Issue 1). <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/438>
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). *Sen2Cor for Sentinel-2*. 3. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). *CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO Soil organic carbon and soil properties*.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Melgarejo, V., Bautista Rodríguez, S. C., & Camargo, M. (2022). Dimensiones y enfoques de valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.devs>
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para Muestreo de Suelos ASA AGUA Y SUELO PARA LA AGRICULTURA*.

- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>
- Pereira, C., Maycotte, C., Restrepo, B., Mauro, F., Calle, A., & Velarde, M. (2011). *CO-OPERATION OFFICE EUROPEAID*. [www.espaciograficosa.com](http://www.espaciograficosa.com)
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 20, Issue 9, pp. 503–510). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O., & Durán-López, 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>
- Pinta, M. (2021). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE RECURSOS NATURALES CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL EN*.
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67(1), 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Rouse, R. W. H., Haas, J. A. W., & Deering, D. W. (1974). *MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS*.
- Salamanca Jiménez, A., Siavosh, ;, & Khalajabadi, S. (2005). *LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA*.
- Schonlau, M., & Zou, R. Y. (2020). The random forest algorithm for statistical learning. *Stata Journal*, 20(1), 3–29. <https://doi.org/10.1177/1536867X20909688>
- Sentinel-2*. (2021).
- Serrano Giné, D., & Galárraga Sánchez, R. (2015). El páramo andino: Características territoriales y estado ambiental. Aportes interdisciplinarios para su conocimiento. *Estudios Geograficos*, 76(278), 369–393. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201513>
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). *Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to*

*Correct Atmospheric Effects? processing step in which correction for atmospheric ef.*  
[www.elsevier.com/locate/rse](http://www.elsevier.com/locate/rse)

- Tejedor Garavito, N., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Boza Espinoza, T., La Torre Cuadros, M., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Jørgensen, P., León, B., López Camacho, R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, M., Pacheco, S., Rey Benayas, J., Reynel, C., Timaná de la Flor, M., ... Cruz, V. (2012). Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, Apdo. 456, Lima 1, Perú. In *Alberdi n°* (Vol. 47, Issue 5). <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=722>
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. In *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* (Vol. 8).
- USGS. (2019). *Landsat 7*.
- Valdez-Zavala, K., Bravo-Peña, L., & Manzo-Delgado, L. (2019). *Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR)*.
- Valencia E, J., Rodríguez P, J.-M., Arias Mendoza, J. J., & Castaño R, J.-M. (2017). VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE INVESTIGACIÓN Y EDUCACIÓN COMO INSUMO PARA LA TOMA DE DECISIONES DESDE LA PERSPECTIVA DE LA GESTIÓN DEL RIESGO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Luna Azul*, 45, 11–41. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.3>
- Vela-Pelaez, A. A., Navarro-Martínez, M. A., Briseño, M. A. M., Sánchez-Sánchez, J. A., & Esparza-Olguín, L. G. (2024). Multitemporal analysis of changes in NDVI in a region with forest harvesting. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 160–186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>
- Yébenes, Á., Álvaro, G., & Sotos, G. (2015). *CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES POR SATÉLITE 3º ITT.SE Sistemas de Telemida*. <http://www.allmetsat.com/es/>

## ANEXOS

### Anexo 1

#### *Recolección de muestras de Páramo*



### Anexo 2

#### *Recolección y traslado de muestras*



**Anexo 3**  
*Análisis en laboratorio*



**Anexo 4**  
*Método de Loss Ignition ( Determinación de Carbono)*



**Anexo 5**  
*Socialización con la Comunidad de Pull Quishuar*

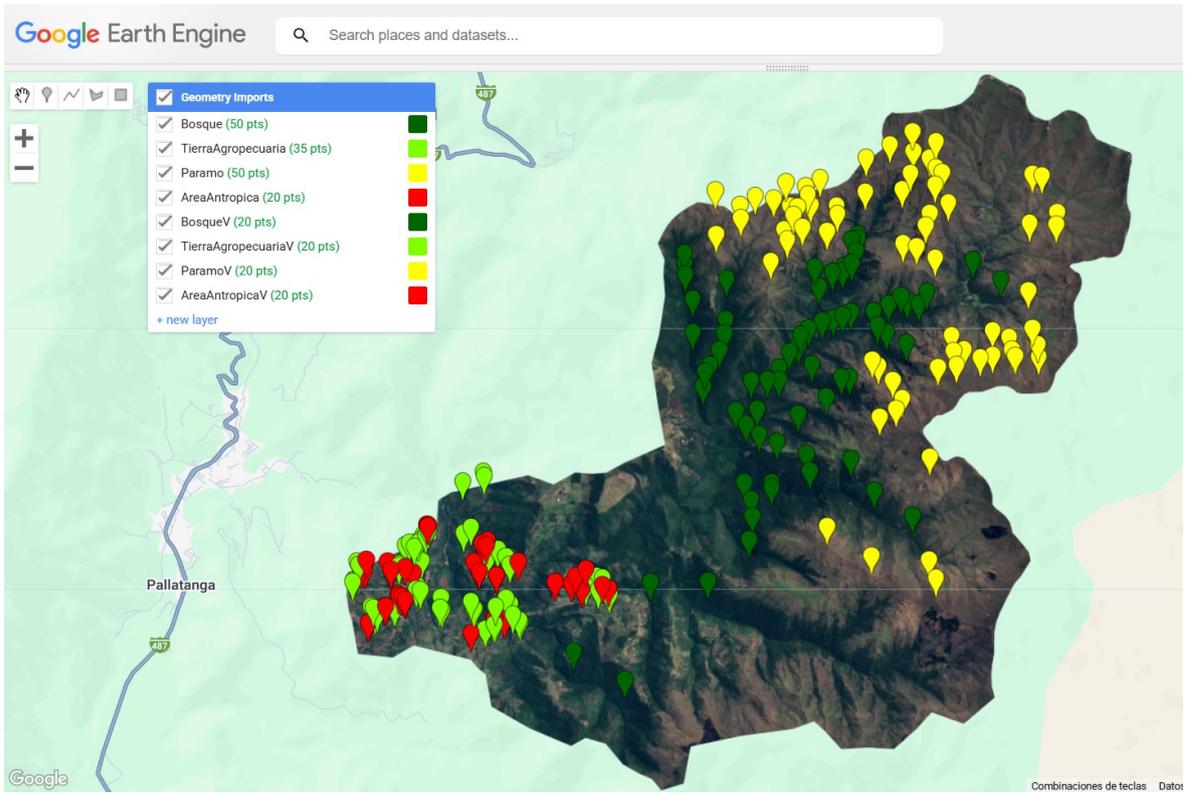


**Anexo 6**  
*Puntos de entrenamiento y validación para GEE ( año 2004)*



## Anexo 7

*Puntos de entrenamiento y validación para GEE (año 2014)*



## Anexo 8

*Puntos de entrenamiento y validación para GEE (año 2024)*

