

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“DINÁMICA DEL STOCK DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO
EN LOS ECOSISTEMAS DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN PRIVADA
TILACANCHA, AMAZONAS, PERÚ”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERA AGRÓNOMA

GRECIA XIMENA LLANOS SÁNCHEZ

LIMA - PERÚ

2024

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

LLANOS, GRECIA 2024.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	4%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	UMBRELLA CONSULTING SAC. "DIA Proyecto Central Hidroeléctrica Carpapata III-IGA0005601", R.D. N° 450-2013-GRJUNIN/DREM, 2020	<1%
	Publicación	
2	indegua.com	<1%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina	<1%
	Trabajo del estudiante	
4	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
5	issuu.com	<1%
	Fuente de Internet	
6	tecnal.com.br	<1%
	Fuente de Internet	
7	sites.google.com	<1%
	Fuente de Internet	

repositorio.inta.gob.ar

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“DINÁMICA DEL STOCK DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN LOS
ECOSISTEMAS DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN PRIVADA TILACANCHA,
AMAZONAS, PERÚ”**

GRECIA XIMENA LLANOS SÁNCHEZ

Tesis para optar el Título de:

INGENIERA AGRÓNOMA

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Federico Alexis Dueñas Dávila
PRESIDENTE

.....
Ing. Mg. Sc. Carlos Julian Mestanza Novoa
ASESOR

.....
Dr. Julio César Alegre Orihuela
MIEMBRO

.....
Dra. Lily Denise Tello Peramás
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mi familia:

Por sus consejos, amor y apoyo incondicional.

A mis amigos:

Por su motivación y apoyo.

A mis maestros:

Cuyas enseñanzas me sirvieron de guía hasta este momento.

Y a todos los que me apoyaron antes y

durante todo el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo:

Al Dr. Percy Zorogastua Cruz, coordinador general del Proyecto “Aptitud del carbono del suelo como servicio ecosistémico en el Área de Conservación Privada Tilacancha”, Contrato Nro 361-2019-FONDECYT, por la oportunidad de ser parte del proyecto.

Al Ing. Mg. Sc. Carlos Mestanza Novoa, por su asesoría, por las capacitaciones extracurriculares y motivación, durante todo el proceso del trabajo de investigación, gracias por la dedicación a este trabajo.

A José Tarrillo, por el apoyo en la parte logística, el apoyo en el trabajo de campo, muestreo de suelos y la motivación brindada.

A María Moya, también tesista del proyecto por el apoyo en el trabajo de campo y gabinete.

A Tony Medina y Rex por ser nuestros guías en la ACP Tilacancha.

Al personal del LIFS, un agradecimiento especial a Don Mario, por su apoyo en el preprocesamiento y por siempre irradiar su buena energía.

A los socios estratégicos del proyecto FONDECYT, UNALM, EMUSAP-Chachapoyas por promover la investigación científica, brindar el apoyo económico y logístico, sin los cuales este proyecto no se hubiese podido concretar.

.

INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
	2.1. Los factores de formación del suelo	3
	2.2. Ciclo Biogeoquímico del Carbono.....	3
	2.3. Dinámica del carbono	5
	2.4. Carbono del suelo	6
	2.4.1 Carbono Inorgánico	6
	2.4.2 Carbono Orgánico.....	6
	2.4.3 Carbono lábil.....	7
	2.4. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM)	7
III.	METODOLOGÍA	8
	3.1 Ubicación del área de estudio.....	8
	3.2 Materiales	9
	3.2.1. Materiales de campo	9
	3.2.2. Materiales de laboratorio	9
	3.2.3 Materiales cartográficos (información espacial).....	9
	3.3. Metodología	10
	3.3.1. Planificación de muestreo de suelos	10
	3.3.2. Mapa de unidades homogéneas	12
	3.3.3. Variables de estudio	12
	3.3.4. Análisis de laboratorio	13
	3.4. Extracción de Información Temporal (GEE).....	21
	3.5. Análisis de Información.....	22
	3.5.1. Preprocesamiento.....	22
	3.5.2. Análisis de datos	22
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
	4.1. Descripción de las Zonas de Vida.....	24
	4.2. Caracterización del carbono orgánico del suelo	25

4.3. Modelamiento del Carbono.....	27
4.4. Dinámica del Carbono entre el periodo 2013 al 2020	28
V. CONCLUSIONES	33
VI. RECOMENDACIONES.....	34
VII. BIBLIOGRAFÍA	35
VIII. ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información satelital	10
Tabla 2: Número de muestras obtenidas para cada ecosistema evaluado.....	11
Tabla 3: Descripción de las variables estudiadas.....	13
Tabla 4: Estadística resumen del carbono del suelo en los ecosistemas del ACP Tilacancha	26
Tabla 5: Parámetros de incertidumbre de los modelos de los stocks de carbono orgánico del suelo.	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo simplificado del ciclo biogeoquímico del Carbono	4
Figura 2: Modelo del concepto básico de la dinámica del carbono en el suelo.....	5
Figura 3: Mapa del área de conservación privada Tilacancha.....	8
Figura 4: Mapa de la distribución de muestras en el Área de Conservación Privada Tilacancha.....	11
Figura 5: Secuencia de pasos para la preparación de muestras	14
Figura 6: Secuencia de pasos para la lectura de pH.....	15
Figura 7: Secuencia de pasos para la determinación de la densidad aparente.	16
Figura 8: Secuencia de pasos para el método de calcinación.	17
Figura 9: Secuencia de pasos para el método de Walkley & Black.....	19
Figura 10: Secuencia de pasos para el método de permanganato.....	21
Figura 11: Correlograma del porcentaje del incremento del error cuadrático medio (%IncMSE) del modelo Random Forest para SCOS y SPOXC.	28
Figura 12: Dinámica del Stock de Carbono orgánico total del suelo (SCOS) entre los años 2013 al 2020.....	29
Figura 13: Dinámica del Stock de Carbono oxidable en Permanganato (SPOXC) entre los años 2013 al 2020.	30
Figura 14: Stock de carbono orgánico total del Área de Conservación Privada Tilacancha. ..	31
Figura 15: Stock de carbono orgánico activo del Área de Conservación Privada Tilacancha.	32

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1: Identificación de covariables ambientales para el factor de formación.	41
Anexo N° 2: Resultados del análisis de pH	43
Anexo N° 3: Resultados del análisis de densidad aparente (da) por el método del terrón parafinado	45
Anexo N° 4: Resultados del análisis de materia orgánica por el método de calcinación (LOI)	47
Anexo N° 5: Resultados del %Carbono orgánico obtenido por Walkley & Black.....	50
Anexo N° 6: Resultados de carbono activo por oxidación en permanganato (KMnO4)	53
Anexo N° 7: Carbono total (%), carbono activo, STOCK_COS y STOC_POXC a los primeros 30 cm de profundidad de los puntos de muestreo.....	56
Anexo N° 8: Overall del VarImp de las variables SCOS y SPOXC.....	59
Anexo N° 9: Stocks promedios de COS y POXC predichas por el modelo para los años 2013 al 2020 según ecosistema.....	59
Anexo N° 10: Modelos randomforest de predicción para SCOS.....	60
Anexo N° 11: Diagrama de correlación del error según la formación de árboles para SCOS.	60
Anexo N° 12: Modelos randomforest de predicción para POXC	61
Anexo N° 13: Diagrama de correlación del error según la formación de árboles para SCOS.	61

LISTA DE ACRÓNIMOS

COT: Carbono orgánico total

COS: Carbono orgánico del suelo

CLS: Carbono lábil del suelo

DS: Decreto Supremo

ECA: Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

GEI: Gases de efecto invernadero

LIFS: Laboratorio e Invernadero de fertilidad de suelos

LOI: Lost On Ignition

MINAM: Ministerio del Ambiente

MOS: Materia orgánica del suelo

POXC: Carbono Oxidable en Permanganato

RF: Random forest

SOC: Soil organic carbon

SCOS: Stock de COS

SPOXC: Stock de POXC

TFSA: Tierra fina seca al aire

UNALM: Universidad Nacional Agraria La Molina

RESUMEN

El carbono orgánico del suelo (COS) es decisivo en la productividad de los ecosistemas, ya que afecta la fertilidad y la capacidad de secuestrar carbono atmosférico en el suelo. Simultáneamente, la dinámica y el secuestro de carbono en el suelo están sujetos a la interacción de factores biológicos, químicos y físicos, siendo la actividad antrópica uno de los principales cambios que afectan significativamente el contenido de carbono orgánico del suelo. Por ese motivo, en la última década, la investigación sobre la dinámica del carbono en el suelo se ha centrado más en el análisis de las fracciones activas de carbono en varios ecosistemas. El Área de Conservación Privada (ACP) Tilacancha preserva los ecosistemas de la Amazonía que brindan valiosos servicios ecosistémicos. La evaluación de la dinámica de las reservas de carbono del suelo es vital para estudiar el servicio de captura de carbono. De esta manera, se evaluaron las variaciones en las reservas de carbono del suelo a lo largo del tiempo en los ecosistemas del ACP Tilacancha. Se extrajeron muestras de suelo en el ACP Tilacancha para analizar el contenido de carbono orgánico, carbono activo y densidad aparente, y calcular el stock de carbono total y activo del suelo. El satélite Landsat 8 se utilizó para recopilar información sobre la reflectancia de la superficie terrestre desde 2013 hasta 2021. Se utilizó el modelo randomforest para predecir los stocks de carbono a partir de imágenes satelitales recopiladas entre 2013 y 2020 y con ello graficar la dinámica. Los resultados mostraron que la dinámica de las reservas de carbono orgánico se mantuvo constante durante todo el período de estudio. Para incrementar el stock de carbono, se recomiendan implementar prácticas de gestión y conservación del suelo.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo, carbono lábil, captura de carbono.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is decisive in the productivity of ecosystems since it impacts fertility and the ability to sequester atmospheric carbon in the soil. At the same time, soil carbon dynamics and sequestration are subject to the interaction of biological, chemical, and physical factors, with anthropic activity being one of the main changes significantly affecting soil organic carbon content. Therefore, in the last decade, research on soil carbon dynamics has focused more on the analysis of active carbon fractions in various ecosystems. Tilacancha Private Conservation Area preserves Amazon's ecosystems that provide valuable ecosystem services. Evaluating the dynamics of soil carbon stocks is vital to studying the carbon sequestration service. Thus, the variations in soil carbon stocks over time were assessed in Tilacancha Private Conservation Area's ecosystems. The methodology consisted of extracting georeferenced soil samples in the ecosystems of the Tilacancha Conservation Area to analyze the content of total organic carbon, active carbon, and bulk density, thereby calculating the stock of total and active soil carbon. In parallel, information on the reflectance of the earth's surface was extracted from the Landsat 8 satellite for the years 2013 to 2021. The randomforest model was used to relate carbon stocks to satellite images from sampling years. The model was applied on data from 2013 to 2020 to predict carbon stocks and thereby graph the dynamics. The result shows that the dynamics of total and active organic carbon stocks are constant between the years of study. To enhance carbon storage, it is recommended to adopt soil conservation and management practices.

Keywords: soil organic carbon, labile carbon, soil carbon sequestration.

I. INTRODUCCIÓN

Desde 1750, la concentración atmosférica de dióxido de carbono ha aumentado en aproximadamente un 49% (de aproximadamente 280 a 416.45 partes por millón en 2021) (Statista, 2022), debido a la combustión de fósiles combustibles y cambios en el uso de la tierra, principalmente para la agricultura (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Sin embargo, la promoción de sistemas mejorados de uso de la tierra y buenas prácticas de manejo de la tierra pueden ayudar a mitigar el cambio climático al reducir las emisiones, ya que los suelos se encuentran entre los mayores reservorios de carbono del planeta y tienen potencial para el secuestro de carbono expandido (FAO, *s.f.*). Es por eso por lo que la FAO como otras instituciones han volcado su atención a la importancia del suelo como uno de los reservorios de almacenamiento de carbono más grandes del mundo y con un potencial de expandir la captura de carbono (CS).

La captura de carbono en el suelo incluye la interacción de elementos con aquellos factores que afectan los cambios en las propiedades del suelo a lo largo del tiempo. Mientras que la dinámica del carbono en el suelo incluye la contribución de material vegetal muerto, la pérdida causada por la mineralización y la acumulación causada por la humificación (Hernández *et al.*, 2014). Los principales factores que inciden en la evolución de la materia orgánica del suelo son: la vegetación, el clima y la propia naturaleza del suelo. (Lal *et al.*, 1998). Es decir que, el contenido de carbono en el suelo depende de factores relacionados con su formación, pero puede modificarse cambiando su uso y manejo. Los factores climáticos y del suelo pueden explicar el almacenamiento de carbono a largo plazo, mientras que los cambios en el uso de la tierra y la vegetación se consideran en un período de tiempo más corto.

Se tiene conocimiento que la gran diferencia de carbono entre las diferentes regiones ecológicas está relacionada con la temperatura y la precipitación, $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los ecosistemas áridos, $8\text{-}10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los ecosistemas tropicales, $21\text{-}24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los ecosistemas polares o boreales (Lal *et al.* 1998), y hasta $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los ecosistemas de

páramo, ubicándose entre los suelos con mayor reserva de carbono en el mundo (Sevink, 2009). Sin embargo, el aumento de actividades como la deforestación, la quema, el pastoreo y la agricultura aumentan las emisiones de carbono a la atmósfera, acelerando así el calentamiento global. Actividades como estas, habían provocado que la región Amazonas haya sufrido un deterioro de sus fuentes de agua como de la calidad de sus suelos, es por ello que en 2010 se logró el reconocimiento del área de conservación privada (ACP) Tilacancha, con una extensión aproximada de 6800.48 ha, mediante la Resolución Ministerial N°118 de 08 de Julio 2010 del MINAM (MINAM, 2010), por un periodo de vigencia de veinte años para la búsqueda de mecanismos de compensación por el cuidado de las cabeceras de cuenca a las comunidades involucradas (APECO, 2008), a través de los MEcanismos de REtribución por Servicios Ecosistémicos (MERESE), los cuales son instrumentos que permiten generar, canalizar e invertir en acciones orientadas a la conservación, recuperación y uso sostenible de los ecosistemas, como fuente de servicios ecosistémicos, a través de acuerdos voluntarios según lo establecido en el Decreto Legislativo N°1280, Ley de Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento.

En la actualidad, en el área de conservación Tilacancha se han desarrollado monitoreos constantes de la calidad y cantidad del recurso hídrico, más no se ha prestado mayor atención a las reservas de carbono tanto en calidad como cantidad, generando un vacío en el conocimiento sobre la dinámica del carbono, la relación de carbono con los tipos de ecosistemas paisajísticos, así como la cantidad de carbono almacenado. Esto ocasiona, la no valoración del secuestro de carbono como servicio ecosistémico como también impiden evaluar y replantear las medidas de gestión más adecuadas para esta ACP.

Objetivos

Se planteó evaluar la dinámica de las reservas de carbono en el suelo en los ecosistemas más representativos del área de conservación privada Tilacancha, para la cuantificación del deterioro de la reserva de carbono. Como objetivos específicos se planteó:

- Caracterizar el carbono orgánico de los ecosistemas representativos del ACP Tilacancha.
- Estimar la dinámica del stock de carbono orgánico de los ecosistemas representativos de la ACP Tilacancha en el tiempo entre el año 2013 y 2020.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Los factores de formación del suelo

Jenny (1941) describió que la formación del suelo está influenciada por cinco factores independientes, pero que interactúan entre sí para dar lugar al suelo y que pueden ser expresados en lo que llamó la Ecuación de los Factores de Estados (ecuación 1). Los factores son: el suelo o una propiedad de este (*s*), el clima (*cl*), organismos vivos (*o*), relieve (*r*), material originario (*mo*) y tiempo (*t*), y los cuales pueden ser clasificados como factores activos (clima y organismos vivos) y factores pasivos (tiempo, material originario y relieve) (Jenny, 1941).

$$s = f(cl, o, r, mo, t) \dots\dots\dots (1)$$

Una actualización del modelo fue propuesta por McBratney et al. (2003), siendo el más utilizado especialmente para el modelamiento y mapeo de suelos ya que involucra además información espacial (ecuación 2). Este modelo se basa en siete factores de predicción los cuales son: atributos medios de suelo (*S*), clima (*C*), organismos (*O*), relieve (*R*), material parental (*P*), edad (*A*), espacio y posición geográfica (*N*), y la cual se representa por la siguiente ecuación:

$$Sc/Sa = f(S, C, O, R, P, A, N) \dots\dots\dots (2)$$

2.2. Ciclo Biogeoquímico del Carbono

Para comprender el ciclo biogeoquímico debemos tener en cuenta el metabolismo el cual refiere a todos los procesos físicos y químicos de los diferentes organismos que convierten o usan energía, siendo el de los organismos autótrofos y heterótrofos los principales, y que en ambos casos sintetizan su biomasa a partir de carbono. Por otra parte, se debe reconocer los depósitos o sumideros de carbono en el planeta como son la atmósfera, el océano, la

biosfera, las rocas y las rocas como combustibles fósiles, y las diferentes formas en las que se encuentran en cada una de ellas (Kutsch *et al*, 2010).

Teniendo estas consideraciones, se podrá entender el ciclo biogeoquímico del carbono como las transformaciones de las fases o estados y el cual inicia cuando las plantas lo utilizan en su forma de CO_2 presente en la atmósfera para realizar la fotosíntesis. Estas plantas son comidas por los herbívoros, los que liberan el dióxido de carbono a través de la respiración y otra parte es almacenada dentro de sus organismos, la cual es trasladada a los carnívoros, cuando se alimentan de los herbívoros. Paralelamente, el océano y organismos acuáticos insertan CO_2 a la hidrósfera. Estos organismos al morir se convierten en: combustible, fósiles, petróleo, gas, carbón y depósito de calizas que se almacenan en la litósfera. Por otro lado, las diversas actividades antrópicas como eventos ambientales aportan CO_2 a la atmósfera (ERESE. 1998).

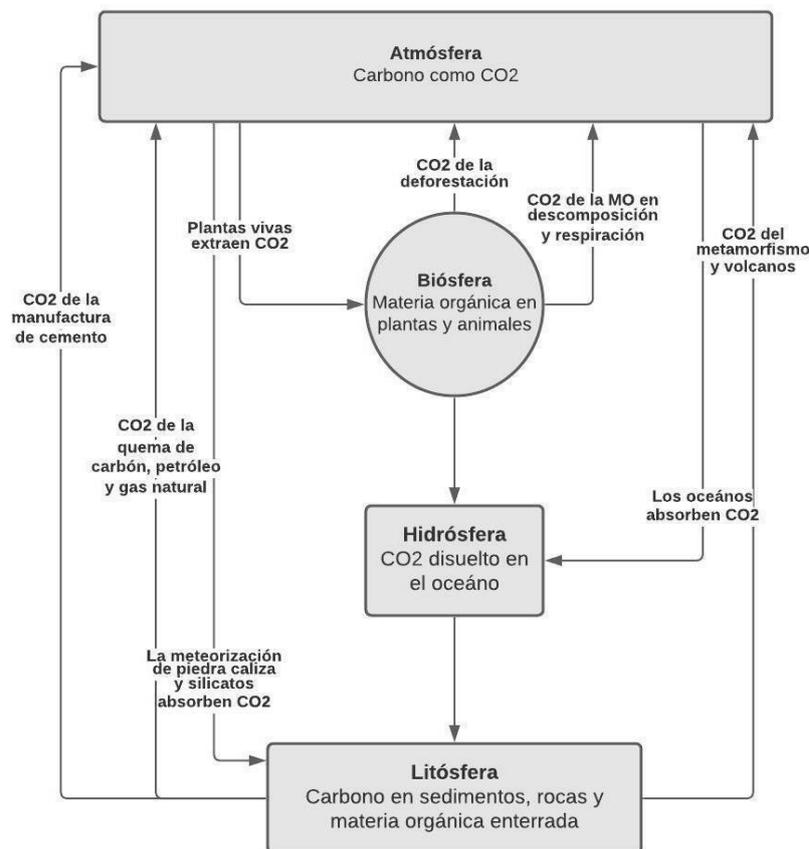


Figura 1: Modelo simplificado del ciclo biogeoquímico del Carbono

Fuente: Adaptado de ERESE (1998)

2.3. Dinámica del carbono

El modelo básico de las dinámicas del suelo se centra en diferenciar los componentes de la respiración por los cuales se aporta carbono orgánico en los ecosistemas terrestres, ya sea a través de la asimilación de este que se pueden transferir directamente a las raíces a través del floema, componente autótrofo, o la producción primaria neta de biomasa y su posterior transferencia al suelo como desechos orgánicos, componente heterótrofo (Kutsch et al, 2010).

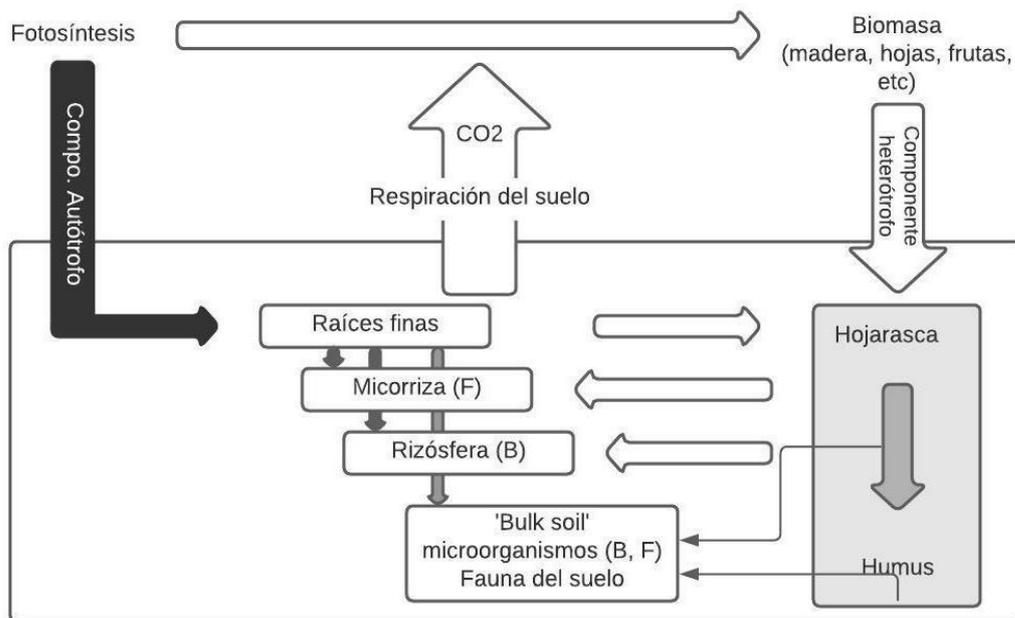


Figura 2: Modelo del concepto básico de la dinámica del carbono en el suelo

Fuente: Adaptado de Kutsch *et al*, 2010.

Kutsch *et al*, 2010 indican que, a través de los años, cuatro han sido las líneas de investigación que se han distinguido en relación con las relaciones del carbono en el suelo: química, física, fisiológica y ecológica. Explicando así que la línea química se concentra en la caracterización de la materia orgánica del suelo y las tasas resultantes de descomposición a través de las propiedades químicas ya que juegan un rol importante en la regulación de la actividad microbiana. La línea física se concentra en los mecanismos físicos que conducen el flujo de masa del CO_2 del suelo a su capa circundante con la atmósfera. La vía fisiológica trata de entender el desempeño de la biota del suelo, analizando cómo sus procesos respiratorios son influenciados por el clima, estructura y la actividad de la biomasa microbiana, raíces y micorrizas, como también las interacciones tróficas en la red de

alimentos del suelo y sus propiedades fisicoquímicas. Y, por último, la línea ecológica entiende las relaciones del carbono del suelo como parte de un ciclo de la materia del ecosistema donde la materia orgánica del suelo juega un rol importante en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Recientemente estas relaciones se han convertido una parte importante en la investigación que gira en torno al cambio climático, y aunque cada una de estas líneas presentan limitaciones para entender y cuantificar las asimilaciones, debemos rescatar las nuevas tecnologías desarrolladas para mejorar la dirección de esta investigación (Kutsch et al, 2010).

2.4. Carbono del suelo

El carbono en el suelo se presenta en dos formas: inorgánico y orgánico.

2.4.1 Carbono Inorgánico

El carbono inorgánico deriva de las rocas o también, como los suelos son sistemas abiertos dado que pueden liberar C en su forma gaseosa de CH₄ (metano) y CO₂ atrapado como carbonato de calcio, pudiendo escapar hacia la atmósfera conformando dos de los más importantes gases de efecto invernadero (GEI) o regresar a precipitarse como minerales como almacenarse de manera orgánica (FAO, 2017). Esta forma de carbono es más estable y por ello menos probable de perderse en comparación a su forma orgánica.

2.4.2 Carbono Orgánico

El carbono orgánico del suelo (COS) es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS), la cual está constituida en promedio por 50% de carbono (Broadbent, 1953), 40% de oxígeno y 3% de nitrógeno, además de otros nutrientes; y es apenas una pequeña parte del ciclo global del carbono, que implica el reciclaje del carbono a través del suelo, la vegetación, los océanos y la atmósfera (FAO, 2017).

La FAO en el 2015 estimaron que las reservas de COS en el primer metro de suelo almacenan 1.500 Pg C, lo cual es más que la suma del contenido atmosférico (alrededor de 800 Pg C) y la vegetación terrestre (500 Pg C). Estas reservas están compuestas principalmente de material orgánico muerto como residuos vegetales y exudados generados por la biota del suelo, y los cuales están compuestos por complejos moleculares simples como compuestos variando así en tamaño como en estabilidad. (Deb et al., 2015)

2.4.3 Carbono lábil

Se le denomina lábil a la fuente más pequeña y de rápida descomposición de la MOS y consecuentemente es rápida y fácilmente descompuesta por los macroorganismos (Krull *et al.*, 2003). El carbono lábil, también conocido como carbono activo, es la fracción de carbono orgánico del suelo que está directamente disponible para la actividad microbiana, por lo tanto, es considerada como la fuente principal de energía para los microorganismos (Haynes, 2005). Su alta sensibilidad y su capacidad de respuesta a corto plazo, convierte al carbono activo en un indicador potencial de las funciones del suelo, en particular: ciclo de nutrientes (como para medir la mineralización de carbono), la formación de agregados, secuestro o captura de carbono (derivado de los cambios en el contenido del carbono total del suelo) y la provisión de hábitats para la biodiversidad (Bongiorno *et al.*, 2019).

Por ello, es de particular interés evaluar el carbono lábil para determinar la salud del suelo y para la evaluación de los ecosistemas (Jensen *et al.*, 2019; Jensen *et al.*, 2020). Para su evaluación existen diversas metodologías, de las cuales se destaca la metodología de Carbono oxidable en Permanganato (POXC) debido a que es una metodología rápida, económica, de fácil aplicación en el laboratorio y también adecuado para pruebas de suelo *in situ* (Culman *et al.*, 2021; Stiles *et al.*, 2011).

2.4. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM)

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio examina los procesos de los ecosistemas y su capacidad para proveer servicios ecosistémicos que influyen en el bienestar humano. Estos servicios derivan directamente de la operación de los ciclos biogeoquímicos, como es el servicio de regulación climática que está estrechamente relacionado al ciclo del carbono, el cual ha sido modificado significativamente ya que en los últimos setenta años, los humanos han cambiado los ecosistemas de una manera tan rápida y extensiva que en cualquier periodo similar en la historia de la humanidad, teniendo un impacto significativo en el incremento del dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero como el metano; principalmente por los cambios de uso de la tierra y manejo del suelo, como la deforestación y la agricultura, que representan un 44% de las emisiones antropogénicas del metano, principalmente por la conversión de la tierra para la agricultura. En este sentido, la comisión evaluadora, consideraba que este servicio se vea aún afectado por el cambio de uso de la tierra esperado, además de la mayor concentración atmosférica, que, si bien puede mejorar la productividad neta, esto no necesariamente conduciría a un incremento en los sumideros de carbono (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

III. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio

El área de conservación privada (ACP) Tilacancha, la cual se encuentra ubicada en el departamento de Amazonas, provincia de Chachapoyas, cuya superficie asciende a seis mil ochocientas hectáreas y cuatro mil ochocientos metros cuadrados (6, 800.48 ha) abarcando las tierras comunales de la Comunidad Campesina de Levanto y la comunidad campesina de San Isidro de Mayno las que se encuentran ubicadas en el Distrito de Levanto y el Distrito de San Isidro de Mayno como se indica en la Resolución Ministerial N° 118 de 08 de Julio 2010 del MINAM (MINAM, 2010).



Figura 3: Mapa del área de conservación privada Tilacancha

3.2 Materiales

3.2.1. Materiales de campo

Para el desarrollo de las actividades de campo se requirieron instrumentos de muestreo que incluyeron: libreta de campo, GPS, cámara digital, una pala, una comba, un manubrio, dos cilindros de volumen conocido, cuchillas, bolsas de papel y de polipropileno, etiquetas, sacos y recipientes para la conservación y transporte de las muestras, entre otros; además de un equipo para campamento de montaña que incluía un botiquín, linterna frontal, carpa estructural, saco de dormir con un confort de 0°, ropa delgada y térmica, zapatos especiales o botas, etc., debido a que la zona es de difícil acceso y se requirieron de varios días para la toma de muestras.

3.2.2. Materiales de laboratorio

Para el desarrollo de las actividades de procesamiento de muestras se requerirá de las instalaciones, materiales y equipos del Laboratorio e Invernadero de Fertilidad de Suelos (LIFS) - UNALM, como también de artículos de escritorio y el equipo de protección personal (EPP) requerido como bata, mascarillas, guantes y lentes de protección de ser necesarios. Entre los materiales requeridos identificamos a materiales volumétricos como probetas, matraz, pipetas, etc.; no volumétricos como vasos precipitados, morteros, tamiz, pera de goma, pisetas, materiales de porcelana, varillas de vidrio, etc.; y reactivos. Los equipos requeridos serán la estufa, la plancha, el espectrofotómetro, la centrífuga, entre otros.

3.2.3 Materiales cartográficos (información espacial)

Para el análisis de resultados se hizo uso de bases de datos para recolectar información satelital para procesamiento con teledetección como son las imágenes Landsat 8, desde el año 2013 a inicios del 2020 Modelo Digital de Elevaciones (DEM) (NASA, 2019), datos climáticos de WorldClim 2.0 (Fick y Hijmans, 2017) entre otros disponibles en Google Earth Engine.

Además, se hizo uso de un computador con sistema operativo Windows 11, procesador AMD Ryzen 7 4700U con Radeon Graphics de 2000 MHz (8 procesadores principales, 8 procesadores lógicos) con 16 GB de memoria RAM y de 1 T de memoria. Se utilizó además el lenguaje de programación R 4.1.0 con interfaz gráfica Rstudio 1.4.1106 (Rstudio Team,

2021), y para el procesamiento de información satelital con teledetección el sistema de información geográfica (SIG) e utilizó los *softwares* sistema de información geográfica QGIS versión 3.24.3 (un software libre y de código abierto), complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (Congedo, 2021) y SAGAGIS 7.8.2 (Tabla 01).

Tabla 1: Información satelital

Material	Fecha	Resolución (m)	Referencia
Modelo Digital de Elevaciones	05-08-2019	30	NASA (2019)
Landsat 8	2013-2020	30-100	USGS (2020)
ASTER		15-90	NASA (2015)
WorldClim 2.0	1970-2000	1000	Fick y Hijmans, 2017

3.3. Metodología

3.3.1. Planificación de muestreo de suelos

Se utilizó como base los lineamientos descritos en el Decreto Supremo N.º 013-2010-AG (MIDAGRI, 2010). El estudio se basó en un nivel de semi detalle utilizando el sistema de información geográfica QGIS versión 3.24.3 para la delimitación de unidades homogéneas derivadas a partir del material cartográfico inicial. Se utilizó el 30 % del área total para estimar el número mínimo de muestras por cada unidad homogénea y luego estas fueron agrupadas por ecosistema (Figura 4 y Tabla 2).

El muestreo fue realizado en mayo del 2021, época en que termina la temporada de lluvias. Los sitios de muestreo fueron seleccionados por mapeo libre y en los sitios de muestreo se realizó una calicata de 40 x 40 cm² de área y 30 cm de profundidad. Se tomaron muestras en dos profundidades: la primera abarcó los primeros 15 cm y la segunda de 15 - 30 cm, y se tomó una muestra de 1 kg de suelo aproximadamente junto con raíces, se colocó en una bolsa hermética codificada. Adicionalmente, se tomó una muestra de suelo con estructura para la evaluación de densidad en el laboratorio. Las muestras se embalaron para ser enviadas al Laboratorio e Invernadero de Fertilidad de Suelos (LIFS).

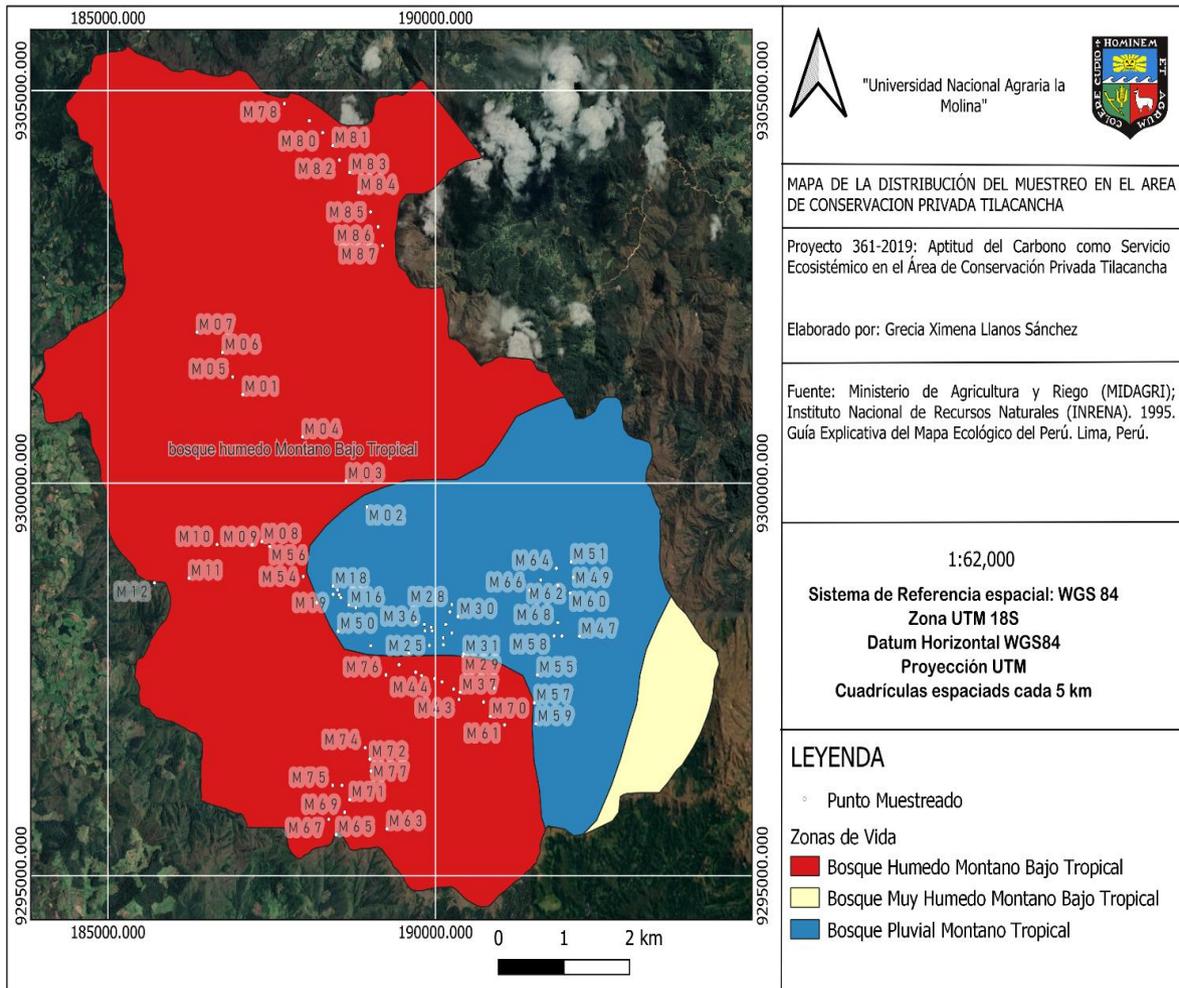


Figura 4: Mapa de la distribución de muestras en el Área de Conservación Privada Tilacancha

Tabla 2: Número de muestras obtenidas para cada ecosistema evaluado.

Ecosistemas	Abreviatura	Número de Muestras
Bosque húmedo montano bajo tropical	bh-MBT	46
Bosque pluvial montano tropical	bp-MT	41
TOTAL DE MUESTRAS		87

3.3.2. Mapa de unidades homogéneas

Para la producción del mapa de unidades homogéneas, se utilizó la información satelital de la tabla 1 y se procesó en el software SAGAGIS para obtener un total de 60 variables relacionadas con los factores de formación de suelos relieve, clima y organismos, y que son los comúnmente trabajados para el mapeo del carbono orgánico del suelo. La tabla del Anexo 01 reporta el total de las variables obtenidas por factor de formación. El modelo digital de elevaciones se corrigió utilizando los datos de curvas de nivel de la carta nacional del Perú a una escala de 1:100,000 (IGN, 2020). Las variables de relieve se produjeron a partir del modelo digital de elevaciones con el módulo Terrain Analysis de SAGAGIS. Las imágenes Landsat 8 se descargaron en su forma de valores digitales, para transformarlas a reflectancia de la superficie de la tierra fueron multiplicadas por el factor 0.0000275. A las imágenes ASTER se les aplicó la corrección radiométrica Dark object subtraction implementada en el complemento Semi-automatic Plugin QGIS para obtener la radiancia espectral. Los índices espectrales fueron obtenidos con el módulo vegetation index, Tasseled Cap y Calculadora Raster. Las imágenes térmicas de Landsat fueron transformadas de grados Kelvin a grados Centígrados para obtener la temperatura de brillo.

Debido a la gran cantidad de información de la data original fue necesario acortar la extensión en base un polígono máscara cuyos vértices tienen las coordenadas 78.78 O, 6.68 S y 76.97 O, 5.53 S y disminuir la resolución a 120 m. Todos los datos fueron re proyectados a un sistema de coordenadas geográficas UTM 18S con Datum WGS84 (EPSG 32718) para su procesamiento y estandarización de la resolución. Las 60 variables fueron procesadas con el análisis de componentes principales para obtener variables independientes, se seccionaron el número de componentes hasta obtener un autovalor de 1. Las componentes principales fueron utilizadas para agrupar los píxeles de la zona de estudio en 11 unidades homogéneas de terreno utilizando el método cluster k-medoides.

3.3.3. Variables de estudio

Para el estudio de la dinámica del carbono se utilizaron once variables seleccionadas y analizadas descritas en la tabla 03 que fueron procesadas en el software QGIS y R.

Tabla 3: Descripción de las variables estudiadas

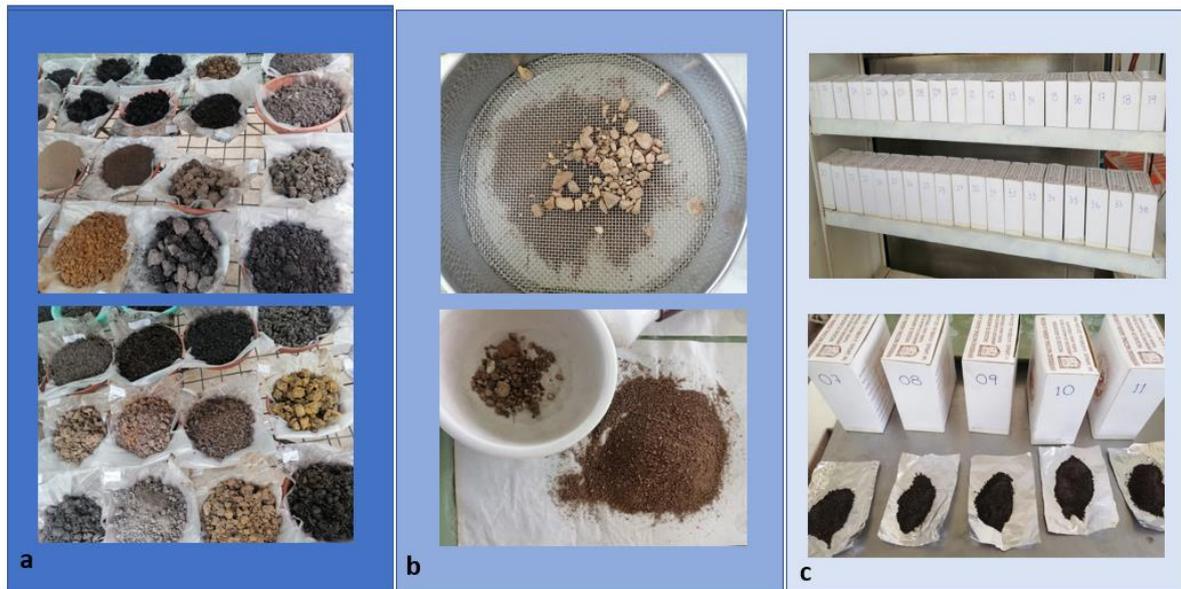
Variables	Abreviación	Unidades	Descripción
Surface Reflectance Landsat lv2 B1-B7	SR_B1	---	Re-escalado 0.0000275
Codificación de muestra	Muestra	---	M01-M87
Profundidad Superior	Top	Cm	0-15 cm
Profundidad Inferior	Bottom	cm	15-30 cm
Densidad aparente	den_pa	$Mg * m^{-3}$	Método del recubrimiento
Carbono Orgánico Total	COS	%	Método Wakley y Black
pH del suelo	pH	s.u.	Dilución 1:1 en agua
Carbono Oxidable en Permanganato	POXC	$mg * kg^{-1}$	Método de oxidación débil
Stock de COS	SCOS	$kg * m^{-2}$	Calculo
Stock de POXC	SPOXC	$kg * m^{-2}$	Calculo
Tiempo	t	Años	Obtenida directamente

3.3.4. Análisis de laboratorio

a. Preparación de muestras de suelo para análisis

Una vez trasladadas las muestras de Chachapoyas a Lima estas fueron trasladadas al LIFS donde fueron sometidas a una preparación previa a la realización de análisis requeridos. Dicha preparación tiene como objetivo la obtención de tierra fina seca al aire (TFSA) y consistió en las siguientes operaciones (Figura 05):

- Secado: La muestra homogénea obtenida en campo se deposita en un contenedor suficientemente amplio y limpio y se deja secar al aire.
- Una vez seca la muestra se desmenuza manualmente para así deshacer todos los terrones que sean posible, además se separa todo material orgánico (hojas secas, raicillas, ramas, etc.).
- Tamizado: La muestra seca se hace pasar a través de un tamiz con abertura de malla de 2 mm, terminando de rompiendo los áridos manualmente, sin utilizar martillos y molinos. Se procede a separar todo material de mayor tamaño. La muestra tamizada es lo que denominamos tierra fina seca al aire (TFSA).
- Una vez obtenida la TFSA se proceden a almacenar en cajas previamente rotuladas y en cantidad suficiente para los diferentes análisis.



NOTA: Secuencia 01: a) secado de las muestras al aire b) pasar toda la muestra por un tamiz con abertura de malla de 2 mm, rompiendo los áridos manualmente, sin utilizar martillos y molinos, obteniendo la denominada Tierra seca al Aire (TFSA) c) almacenar las muestras en cajas previamente rotuladas.

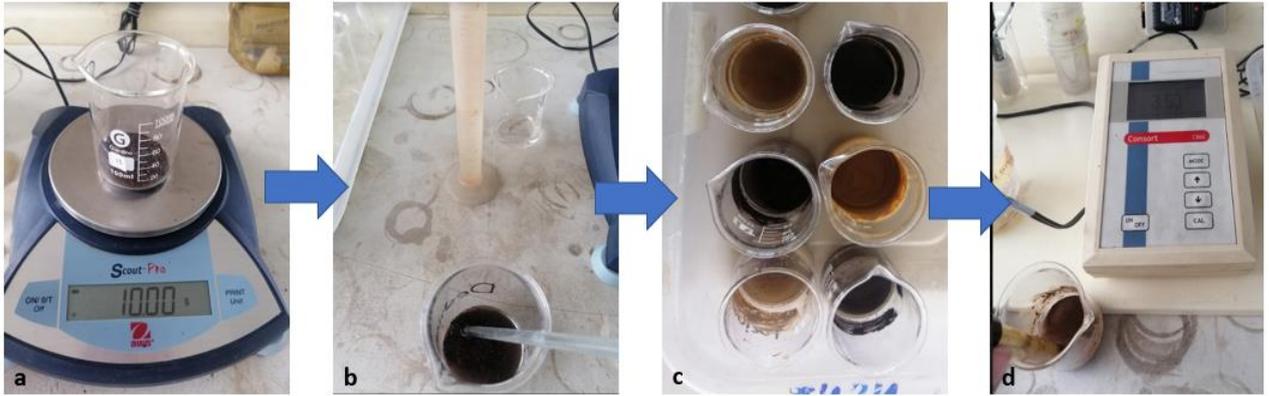
Figura 5: Secuencia de pasos para la preparación de muestras

b. pH: Medida en el Potenciómetro de la suspensión suelo-agua 1:1

La lectura del pH de las muestras se realizó de la suspensión suelo-agua resultante de mezclar 20 g de suelo (TFSA) con 20 mL de agua desionizada (relación 1:1) con un medidor multiparámetro marca Consort modelo C860 previamente calibrado en base a 2 puntos con una solución tampón de pH 4 y pH 7. Una descripción gráfica del proceso se detalla en la Figura 06 y mayor detalle en el Anexo 02.

Procedimiento:

- A 10 g de suelo, previamente pesados en un vaso de precipitados de 50mL, agregamos 10mL de agua desionizada, cubrir y agitar continuamente la suspensión durante 15 min.
- Dejar reposar la suspensión del suelo durante aproximadamente 30 minutos para permitir que la mayor parte de la arcilla suspendida se asiente de la suspensión o se filtre o se centrifugue de la fase acuosa para medir el pH.
- Inserta el electrodo en la solución de muestra, ajustando el electrodo y sumergiéndolo lo suficientemente profundo en la solución transparente sobrenadante para establecer un buen contacto eléctrico a través del agujero capilar.
- Finalmente, se procede a tomar la lectura estabilizada en el multiparámetro.

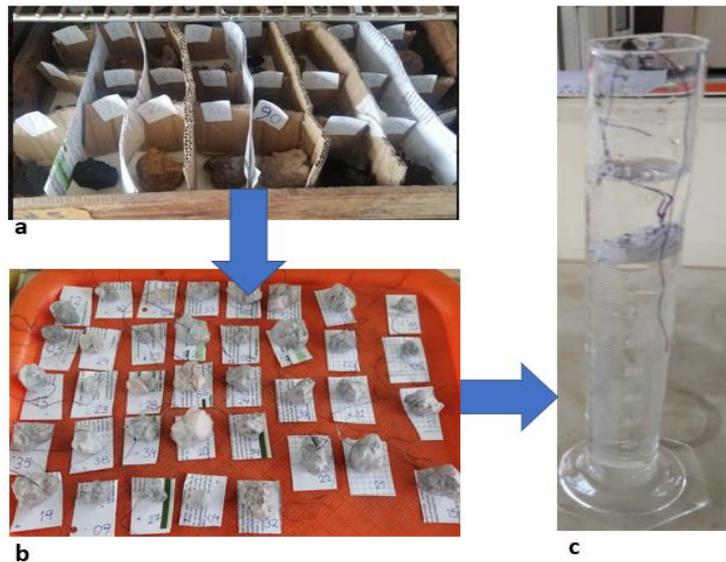


NOTA: Secuencia 02. a) Pesado de 10 g de TFSA. b) Se añaden 10 ml de agua desionizada. c) batir y dejar reposar la suspensión. d) Tomar la lectura de pH con el multiparámetro.

Figura 6: Secuencia de pasos para la lectura de pH

c. Densidad aparente: Método del terrón parafinado

Se determinó por el método del terrón parafinado o también conocido como el método del recubrimiento, el cual se consiste en tomar un terrón de suelo in-disturbado con la humedad de campo y puesto a secar a estufa a 105°C por 24 horas, para luego ser pesado (P_s); luego, se sumerge el terrón previamente amarrado a un hilo, por unos segundos, en un recipiente que contenga parafina líquida (de densidad $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) hasta que se impermeabilice y pueda ser pesado nuevamente. Finalmente, este se sumerge en una probeta que contenga una cantidad conocida de agua y se procede a medir el volumen desplazado al introducir el terrón. El peso de cada terrón sumergido se transformará en el volumen del terrón con parafina (V_a) por el principio de Arquímedes. Una descripción gráfica del proceso se detalla en la Figura 07 y mayor detalle en el Anexo 03.



NOTA: Secuencia 03. a) Secar a estufa los terrones b) Cubrir en parafina los terrones c) Sumergir el terrón parafinado en una probeta con un volumen conocido de agua y anotar el volumen desplazado

Figura 7: Secuencia de pasos para la determinación de la densidad aparente.

d. Carbono total del suelo (COT)

- Método de Calcinación

El método de calcinación o también conocido como método de pérdida en ignición, (LOI por sus siglas en inglés) es una técnica sencilla que requiere solo un horno de mufla, crisoles cerámicos y una balanza analítica.

Se basa en la oxidación térmica de la materia orgánica a altas temperaturas donde la pérdida de peso de la muestra es proporcional a la cantidad de la materia orgánica del suelo; el cálculo de la concentración del carbono orgánico del suelo a partir de este método se da en la suposición de que el carbono orgánico constituye el 58% de la LOI, que es la recíproca de la constante de van Bemmelen 1.726 (van Bemmelen, 1891 citado por Westman et al., 2006). Una descripción gráfica del proceso se detalla en la Figura 08 y mayor detalle en el Anexo 04.

Procedimiento propuesto por Bazán, 1996:

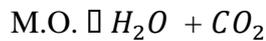
- Secar la muestra de suelo a 105°C usando una estufa por 24 horas.
- Pesar con exactitud el crisol y colocar dentro un peso de suelo conocido (5g aproximadamente) de suelo secado a 105°C.

- Calcinar la muestra a 550°C por 5 horas. Enfriar en un desecador y pesar con aproximación de 0.001 g.

Cálculos:

- Peso seco a 105 °C por 12 horas.

- Calcinación a 550 °C



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

- Calcinación a 950 °C



$$\text{Pérdida de peso a 950 } ^\circ\text{C} = \frac{\text{peso seco a } 555^\circ\text{C} - \text{peso seco a } 950^\circ\text{C}}{\text{peso seco a } 105^\circ\text{C}} * 100$$



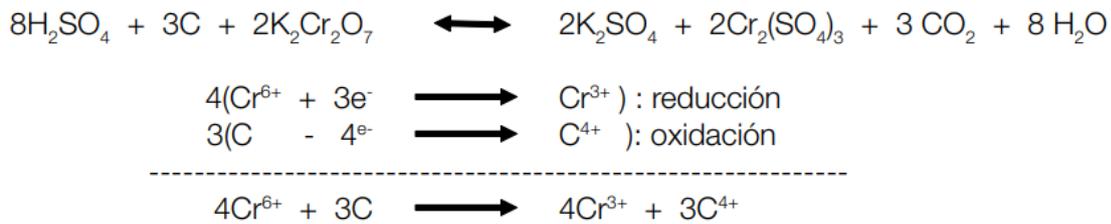
NOTA: Secuencia 04. a) Programar la estufa a la temperatura adecuada b) muestras calcinadas.

Figura 8: Secuencia de pasos para el método de calcinación.

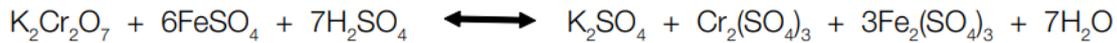
- Método de Walkley y Black

El método Walkley–Black (basado en Walkley and Black, 1934) mide el carbono orgánico del suelo usando una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico como agentes oxidantes, se basa en que la materia orgánica será oxidada y el exceso de dicromato se determina por titulación con FeSO_4 o con $(\text{NH}_4\text{Fe})_2(\text{SO}_4)_3$. Una descripción gráfica del proceso se detalla en la Figura 09 y mayor detalle en el Anexo 05.

La primera reacción de oxidación reducción se expresa en la siguiente ecuación:



Mientras que la segunda reacción de titulación es:



Procedimiento:

- En un matraz Erlenmeyer de 500 mL poner entre 0.25 a 0.5 g de suelo por ser suelos oscuros. En forma paralela llevar un blanco (sin muestra) para conocer la normalidad del sulfato ferroso.
- Se adicionan 20 mL de 1 N dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- Adicionar 20 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de grado técnico.
- Mezclar para homogeneizar la solución en la campana de extracción ya que durante esta reacción hay generación de calor y vapores.
- Dejar en reacción por 24 horas.
- Al siguiente día, se adicionan aproximadamente 200 mL de agua destilada.
- Adicionar, además, 5 mL de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4) y 0.5 mL del indicador difenil amina sulfúrica.
- Titular con 0.5 N de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), con agitación y en forma lenta hasta observar el cambio de color: de violeta a verde. Apenas se observa el cambio se procede a detener la titulación.
- Titular el blanco.

Cálculos:

- La estequiometria de la reacción muestra que cada 10 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 10$ meq de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 10$ meq de C = 30 mg de C.
- Si adicionamos sulfato ferroso amoniacal (a mL) al blanco (b mL) para la muestra, la diferencia de titulación a – b corresponde con:

$$\frac{30 \times (a-b)}{a} \text{ mg C}$$

- Si el peso de la muestra fuese 1 g, el contenido de carbono oxidable es:

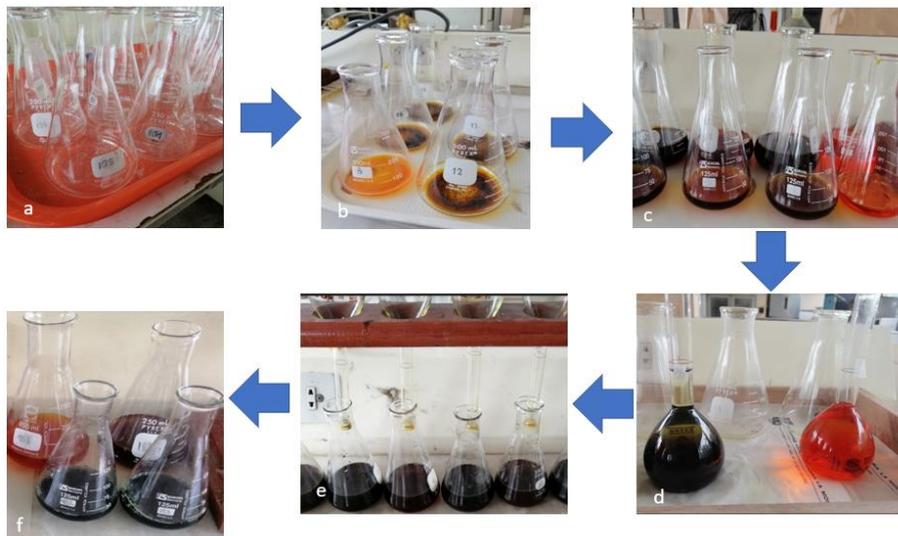
$$\frac{30 \times (a-b) \times 100}{a \times 1000} \text{ g C por 100 g de suelo}$$

$$C (\%) = \frac{3(a-b)}{a}$$

- Teniendo en cuenta que se calcula que en el proceso de oxidación sólo es del 75% del carbono orgánico total presente, el valor equivalente de carbono es de 4 en vez del valor estequiométrico de 3. Siendo la resultante:

$$C (\%) = \frac{4(a-b)}{a}$$

- Se asume además que la materia orgánica está constituida por 58% de C, por lo que el porcentaje de materia orgánica es: $MO (\%) = C (\%) * 1.724$



NOTA: Secuencia 05. a) Rotulación de los matraces. b) Incorporar a la muestra de suelo el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) más ácido sulfúrico (H_2SO_4) c) Esperar 24 horas aproximadamente hasta que se complete la reacción. d) El contenido se vierte a una fiola de 100 mL y se enraza. e) El contenido de la fiola se devuelve al matraz inicial. f) Del contenido inicial se procede a tomar una alícuota de 20 mL y se procede a titular con el sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) o hasta notar el viraje de color.

Figura 9: Secuencia de pasos para el método de Walkley & Black.

e. Carbono Activo

El protocolo utilizado fue el descrito por Culman (2017), el cual toma de referencia el método de carbón activo descrito por Weil et al. (2003), cuyo fundamento consiste en oxidar la fracción lábil del carbono del suelo con una solución de ataque de permanganato de

potasio ($KMnO_4$) y el cual es aplicable a muestras de suelo. Una descripción gráfica del proceso se detalla en la Figura 10 y mayor detalle en el Anexo 06.

Procedimiento:

- **Solución Madre de $KMnO_4$ (preparación para 1 L):** Se pesarán 147 g de cloruro de calcio ($CaCl_2$), el cual se colocará en un beaker de 1000ml en el cual se agregarán aproximadamente 900mL hasta diluir con apoyo de un agitador magnético, posteriormente se transferirá a una fiola de 1000mL donde se enrazará. Luego, se pesarán 31.61 g en un beaker de 1000mL $KMnO_4$ y se completará con aproximadamente 900mL de la solución de $CaCl_2$, diluir y ajustar el pH a 7.2 utilizando gotas de NaOH 0.1 N, una vez ajustado el pH, verter el contenido a una fiola de 1000mL y enrazar con la solución de $CaCl_2$.
- **Preparación de muestras:** Esta será la solución de oxidación para las muestras. Se pesarán entre 0.5-5 g de muestra de suelo homogeneizada y tamizada a 2 mm en un tubo para centrífuga de 50 mL, a la cual se añadirá 2 mL de la solución madre y 18 mL de agua desionizada. Los tubos se cierran herméticamente y son agitados vigorosamente a mano durante dos segundos para asegurar la mezcla del suelo con la solución. Los tubos son llevados al agitador a 240 oscilaciones (120 rpm) por 2 minutos. Luego de los 2 minutos se agita nuevamente a mano para asegurar que no haya partículas adheridas a los lados o en la tapa del tubo. En este punto, se procede a retirar las tapas y se colocan las muestras en una cámara oscura, dejándolas por 10 minutos hasta lograr que el suelo sedimente.
- **Dilución de la muestra:** Finalmente, se transferirían 0.5.mL del sobrenadante en un tubo para centrífuga conteniendo 49.5mL de agua destilada, se cierra para agitarlo manualmente, tomaremos una alícuota en la celda que se leerá en colorímetro a 550 nm. Paralelamente se realizarán blancos en cada ronda de muestras analizadas.
- **Curva de calibración:** Se requerirá preparar una solución patrón con 2.5mL de solución de oxidación y 7.5mL de agua destilada. De esta solución se tomará 0.5mL, 1mL y 2mL para transferir cada volumen a un tubo para centrífuga de 50mL, conteniendo 45mL de agua el cual se llevará a enrazar a 50mL, se agitará

manualmente y leerá en el colorímetro a una longitud de onda de 550nm para hacer una curva de calibración con las absorbancias observadas.

- **Cálculos:**

$$POXC = [0.02 \text{ mol. L}^{-1} - (a + b \times Abs)] \times (9000 \text{ mg C. mol}^{-1}) \times \left(\frac{0.02 \text{ L solución}}{0.005 \text{ kg suelo}} \right)$$

Donde: 0.02 mol/L: es la concentración de la solución inicial de $KMnO_4$; a y b: intercepto y la pendiente de la curva estándar; Abs: Absorbancia obtenida por el colorímetro; 9000 mg: Peso de carbono (0.75 mol) oxidado por 1 mol de $KMnO_4$ -cambiando de Mn^{+7} a Mn^{+2} ; 0.02 L: Volumen de la solución de $KMnO_4$ que reaccionó y 0.005 kg: Peso del suelo usado. Estimación realizada por Blair et al., (1995).



NOTA: Secuencia 06. a) Peso de las muestras. b) Añadimos la solución oxidante c) Sellar los tubos herméticamente y agitar. d) Agitar y destapar. e) Tomar alícuota de 0.5mL y vaciar en tubos con agua. f) Enrazar a 50 Ml. g) Verter una alícuota en la celda. h) Llevar al colorímetro y leer a 550 nm.

Figura 10: Secuencia de pasos para el método de permanganato.

3.4. Extracción de Información Temporal (GEE)

Para ver la variación temporal del carbono es necesario tener datos históricos de variables relacionadas. Para dicho propósito, a través de Google Earth Engine, se utilizaron las

colecciones de imágenes de Landsat 8 Surface Reflectance Tier 2, para el periodo comprendido entre enero del 2013 a diciembre del 2020. En el procedimiento se cortó los pixeles que contenían nubes registradas en la banda de calidad de cada imagen. Para cada pixel se recolecto la información de las Surface reflectance de las bandas 1 a la 7.

3.5. Análisis de Información

3.5.1. Preprocesamiento

Los datos resultantes del análisis de laboratorio fueron evaluados para identificar y corregir los datos influyentes y anómalos de la base de datos. Para ello, primero se estandarizó las unidades de todos los datos de carbono orgánico, transformándolos a porcentaje. Luego se identificó que muestras contenían valores de carbono oxidable en permanganato con valores mayores que el contenido de carbono orgánico total, pues son valores inconsistentes, estos valores fueron eliminados quedando la celda del dato vacía. Las celdas con datos vacíos se imputaron mediante el método predictive mean matching del paquete mice en el lenguaje R utilizando los datos de pH y materia orgánica. Los datos luego del procedimiento de preprocesamiento pueden revisarse en los anexos 2, 3, 4, 5, y 6.

Se calcularon los stocks de carbono orgánico total (SCOS) y activo (SPOXC) en base a los datos de carbono orgánico total (COS) y carbono oxidable en permanganato (POXC) para cada profundidad en base a los siguientes cálculos:

- Stock de carbono orgánico del suelo (SCOS):

$$SCOS = \%COS * prof * da * m^2$$

- Stock de carbono activo (SPOXC):

$$SPOXC = POXC_{ppm} * prof * da * m^2$$

El resultado se obtuvo en kg.m² para cada profundidad y luego fueron sumados para obtener el stock por superficie de suelo de 0 a 30 cm de profundidad (Anexo 7).

3.5.2. Análisis de datos

Para caracterizar el stock de carbono de los ecosistemas se calcularon la media y varianza de los sitios de muestreo correspondientes al bosque húmedo montano bajo tropical (bh-MBT) y bosque pluvial montano tropical (bp-MT). El stock de carbono promedio representa

la cantidad de carbono (kg) que existe por unidad de área (m²) en cada ecosistema, estos valores se multiplicaron la área ocupada por cada ecosistema para obtener el stock total para cada ecosistema. Para estimar la dinámica del carbono fue necesario primero relacionar el stock de carbono de las muestras con los datos de las imágenes Landsat del año de muestreo utilizando el modelo random forest, de la siguiente forma:

- Stock de carbono orgánico del suelo (SCOS):

$$\mathbf{SCOS=SR1+SR2+SR3+SR4+SR5+SR6+SR7}$$

- Stock de carbono activo (SPOXC):

$$\mathbf{SPOXC=SR2+SR3+SR4+SR5+SR6+SR7}$$

El modelo Random Forest (RF) se han convertido en una herramienta de análisis de datos que funciona bien en comparación de la “comparación de la clasificación de iteración única” y el “análisis de regresión de árboles”. El modo que tienen de ajustar los modelos RF las particiones es a través de una serie de datos históricos con los que permiten determinar la pureza de los modos y la desviación de la media obtenida para cada uno de ellos en comparación con estos datos reales.

El primer paso para poder trabajar la dinámica fue elaborar las bases de datos en el tiempo de las imágenes satelitales. Para cada año en el periodo de enero del 2013 a diciembre del 2020 fue necesario descargar una serie de archivos que reflejaran el valor de la reflectancia en cada punto de muestreo entre los años 2013 al 2020. En total se extrajeron 4264 datos entre los 86 sitios de muestreo con información de la reflectancia de la superficie de la tierra correspondientes a las siete bandas de Landsat que representan la energía reflejada en las longitudes de onda del azul (SR2), verde (SR3), rojo (SR4), infrarrojo cercano (SR5), infrarrojo medio 1 (SR6), e infrarrojo medio 2 (SR7). Luego el modelo Random Forest fue aplicado sobre las bandas de Landsat para obtener el valor del stock del carbono orgánico del suelo (SCOS) y el stock del carbono activo (SPOXC) para cada fecha y sitio de muestreo entre el 2013 y 2020.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción de las Zonas de Vida

De acuerdo con los criterios de clasificación ecológica basada en zonas de vida desarrollados por Holdridge (1978), la ONERN en 1976 y luego INRENA en 1995 identificaron y plasmaron en el Mapa Ecológico 3 zonas de vida para el área de estudio, las que se describen a continuación:

4.1.1. Bosque húmedo montano bajo tropical (bh-MBT):

Se sitúa entre los 2.000 y 3.000 metros sobre el nivel del mar. El clima es húmedo-templado cálido, con una temperatura media anual entre 17°C y 12°C y precipitaciones entre 900 y 1800 milímetro. Esta es la zona donde interviene más directamente la ACP Tilacancha, principalmente por la expansión de los linderos agrícolas y el sobrepastoreo, ya que proporciona las condiciones bioclimáticas adecuadas para la ganadería y la agricultura, con la cual se produce una amplia gama de cultivos. Existiendo así poca vegetación primaria y pudiéndose observar bosques remanentes, especialmente en laderas escarpadas y fondos de barrancas. APECO en 2008, encontró y recomendó especies maderables como el aliso, ulcumanu o romerillo, golem, carapaccio, etc., para la reforestación. Asimismo, identificó vegetación típica de la zona de vida al carricillo, suro, mora y epífitas moderadas representadas por bromelias, líquenes y musgos. Esta zona de vida abarca el 72% del área total del ACP (4'935 ha aproximadamente).

4.1.2. Bosque pluvial montano tropical (bp-MT):

Se distribuye entre los 2900 y 3900 msnm, en la parte alta de la Cordillera. El clima es súper húmedo - templado frío con temperaturas medias entre 12°C y 6°C por año, y precipitación total, con un promedio anual entre 2.000 y 4000 mm. La topografía es abrupta en la cual predominan laderas con declives, los suelos son delgados, por lo que la vegetación original es un bosquecillo relativamente bajo con abundante capa epífita. En altitudes elevadas, la calidad del bosque disminuye y se vuelve atrofiado, predominando los pastos, como *Stipa*,

calamagrostis y *Festuca*, formando una extensión de pastos naturales altoandinos o jalca. Los derrumbes y la pérdida de terrenos son muy característicos debido a la fuerte pendiente, además de la erosión del suelo por el agua (MIDAGRI & INRENA, 1995). Esta zona de vida abarca el 24% del área total del ACP (1'625 ha aproximadamente).

4.1.3. Bosque muy húmedo Montano bajo tropical (bmh-MBT):

Se sitúa entre los 1.900 y 3.200 metros sobre el nivel del mar. Se estima que la biotemperatura media anual varía entre los 12°C y 17°C y precipitaciones entre 2000 y 4000 milímetros. El relieve topográfico es muy accidentado, con pendientes que sobrepasan el 7% lo cual hacen de esta zona de vida de muy complejo acceso y consecuentemente, su estudio es limitado. La vegetación es densa y alta, la cual se suele distribuir en estratos. Esta es una zona de vida con muy escaso potencial o un potencial muy poco favorable para el desarrollo agrícola y ganadero; sin embargo, cubre gran parte del sistema hídrico de la microcuenca por lo que tiene importancia como Bosque de Protección (MIDAGRI & INRENA, 1995). Esta zona de vida abarca apenas el 4% del área total del ACP (250 ha aproximadamente).

4.2. Caracterización del carbono orgánico del suelo

La Tabla 04 muestra el resumen estadístico de las variables del carbono orgánico del suelo del Área de Conservación Privada Tilacancha. El stock total acumulado de carbono orgánico total fue de 1'584.63 Gg de carbono en el bosque húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) y de 451.91 Gg de carbono en el bosque pluvial Montano Tropical (bp-MT). El ecosistema bosque húmedo acumula 3.5 veces más carbono que el bosque pluvial, debido a que este tiene mayor área cubierta dentro del Área de Conservación Tilacancha. Sin embargo, al observar la concentración de carbono orgánico ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), el bosque húmedo sólo tiene una concentración 0.15 mayor. Se puede inferir que ambos ecosistemas tienden a acumular concentraciones de carbono orgánico similares. Los resultados están muy por encima de los reportados por Ahirwal (2021) sobre un bosque primario en los Himalayas, India, reportó una media de $11.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Marques (2016), obtuvo datos de la región amazónica de Brasil y reportó $13.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Pero muy similares a los reportados por Gutierrez et al 2020, donde el COS estimado varió entre 2,2 y $33,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, con promedio de $16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ en ecosistemas de páramo en Colombia. Dentro de un mismo país es posible encontrar valores contrastantes, Akpa (2016) reportó $3.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ en Nigeria, valores muy

inferiores en comparación a los nuestros, pero su estudio consideró contabilizar el carbono orgánico de ecosistemas agrícolas y naturales en conjunto, la actividad agrícola tiende a disminuir el contenido de carbono por actividades como labranza, dando como consecuencia valores medio inferiores.

Tabla 4: Estadística resumen del carbono del suelo en los ecosistemas del ACP Tilacancha

Ecosistema	Parámetros	COS (%)	POXC (mg.kg ⁻¹)	SCOS (kg.m ⁻²)	SPOXC (kg.m ⁻²)
bh-MBT	Media (STD)	5.70	13.51	32.11	0.33
	[Min - Max]	2.66 - 27.70	5.87 - 67.03	10.01 - 78.04	0.11 - 1.11
bp-MT	Media (STD)	5.37	11.29	27.81	0.25
	[Min - Max]	1.46 - 33.66	3.33 - 74.98	4.72 - 78.04	0.06 - 0.66

Nota: El valor medio se obtuvo como promedio de todas las muestras dentro de los límites del ecosistema. Los valores Min y Max representan el valor mínimo y máximo de las muestras dentro de los límites del ecosistema.

El carbono activo, obtenido por oxidación con permanganato de potasio, tiene una estrecha asociación con el carbono mineralizable (Hurisso et al, 2016). El carbono activo es un indicador de la cantidad de carbono que se mineralizará cada año y generalmente es afectado por el manejo de suelo, y estabilidad de la materia orgánica del suelo. Los resultados reportados en este estudio indican que el carbono activo representa el 1.03% del carbono orgánico total en el bosque húmedo Montano Bajo Tropical y 0.9% en el bosque pluvial Montano Tropical. Los resultados sugieren que ambos ecosistemas tienen a perder similares cantidades de carbono por procesos de mineralización. Lao (2017), reportó que el carbono activo representa el 1.2 por ciento del carbono orgánico total para Yurimaguas cuyas temperaturas fluctúan entre 21 y 31 °C. Los ecosistemas del Área de Conservación Privada Tilacancha tienen temperaturas entre 6 – 17 °C, la proporción del carbono activo debería ser inferior a lo reportado en Yurimaguas, pues la temperatura disminuye la actividad de los organismos descomponedores. Previo a su constitución, el Área de Conservación Privada Tilacancha era utilizada para la producción agrícola y pecuaria. Salas *et al.*, (2018) reporta un incremento de la degradación entre 1984 y 2016, producto de la ganadería y agricultura en la zona. Las condiciones degradadas de la zona de estudio tienen un efecto incrementando las cantidades de carbono activo de los ecosistemas, lo que explica nuestros valores. A pesar de esto, nuestros valores se encuentran dentro de los rangos normales, Hurisso *et al.*, (2016) reporta que las variaciones son entre 1 y 4 por ciento para suelos agrícolas en Norteamérica.

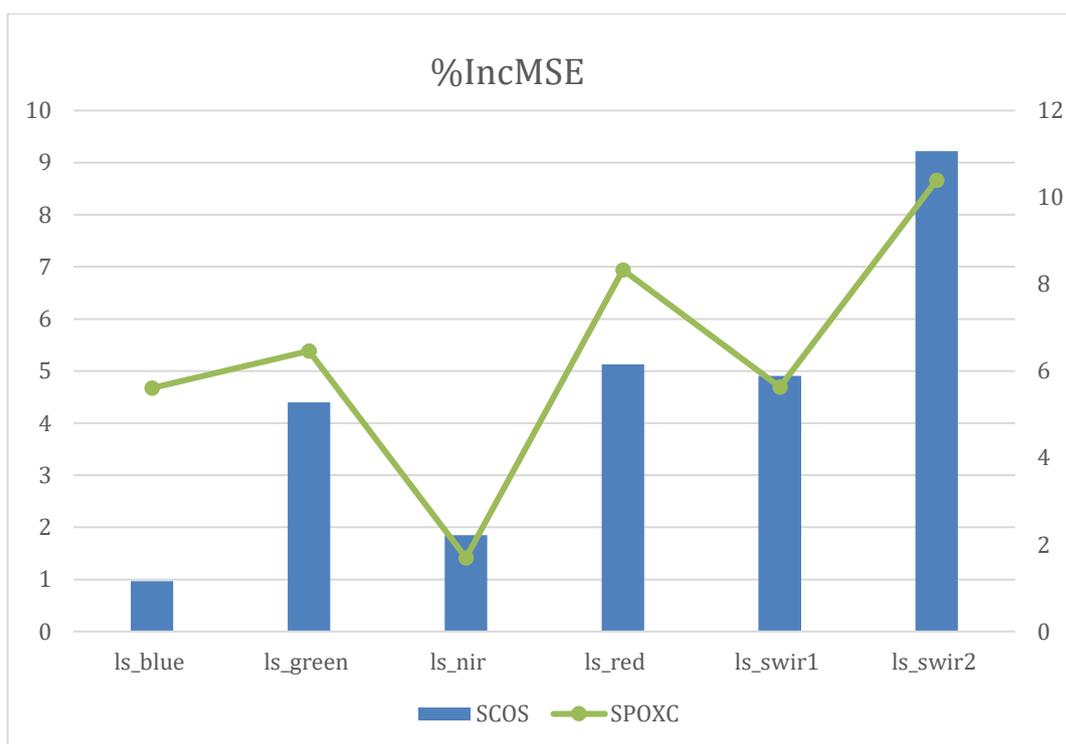
4.3. Modelamiento del Carbono

Los stocks de carbono orgánico total (SCOS) y activo (SPOXC) se modelaron utilizando los datos de las imágenes satelitales Landsat 8 de fechas cercanas al muestreo (2020 y 2021). El modelo utilizado fue el random forest. La tabla 5 resume los parámetros obtenidos para los modelos, para el SCOS, los resultados no fueron satisfactorios y los valores son inferiores a los reportados por autores de la literatura. Nguemezi *et al.*, (2021) reportó valores de $RMSE=1.32 \text{ kg.m}^{-2}$, $R^2 = 0.58$ y $ME= -0.003 \text{ kg.m}^{-2}$ para Camerún, y Szatmári *et al.*, (2021) reportó valores de $RMSE = 2.013 \text{ kg.m}^{-2}$, $ME = - 0.33 \text{ kg.m}^{-2}$ para Hungría. El error de predicción de esta investigación fue mayor ($RMSE = 7.49 \text{ kg.m}^{-2}$) al reportado en literatura, pero la varianza fue mas pequeña ($R^2 = 0.91$), es decir, el modelo predice nuevos valores con mayor error, pero el modelo explica bien la relación entre los stocks de carbono y las imágenes satelitales. A pesar de ello, el error de predicción obtenido es aceptable para la investigación ya que representa una cantidad pequeña dentro del rango (Máximo – Mínimo) de datos obtenidos (64.9 y 64.6). El error representa un 9 por ciento del rango total de los datos.

Tabla 5: Parámetros de incertidumbre de los modelos de los stocks de carbono orgánico del suelo.

RESPUESTA	ME	MAE	RMSE	R ²	NSE
SCOS	-0.31	5.34	7.49	0.91	0.79
SPOXC	-0.01	0.05	0.08	0.90	0.76

La figura 11 muestra el aporte de las variables obtenidas de las imágenes satelitales sobre los stocks de carbono orgánico predichos. El resultado muestra que en la predicción del carbono orgánico total las variables relacionadas con la energía reflejada en las longitudes de onda infrarrojo medio (ls_swir2) son las más importantes y las menos importante son las longitudes de onda azul (ls_blue) y el infrarrojo cercano (ls_nir). Para el carbono activo la situación es parcialmente similar, pues el infrarrojo sigue siendo la variable más importante, y la menos importante las longitudes de onda infrarrojo cercano. Los resultados coinciden con la literatura, Zimmermann *et al.*, (2007) demuestra que la energía reflejada en el infrarrojo medio es la que tiene mejor relación con las fracciones de carbono orgánico del suelo estables y lábiles. Debido a que, para nuestros datos se cumplió con el carbono orgánico total, y en menor medida con el carbono activo.

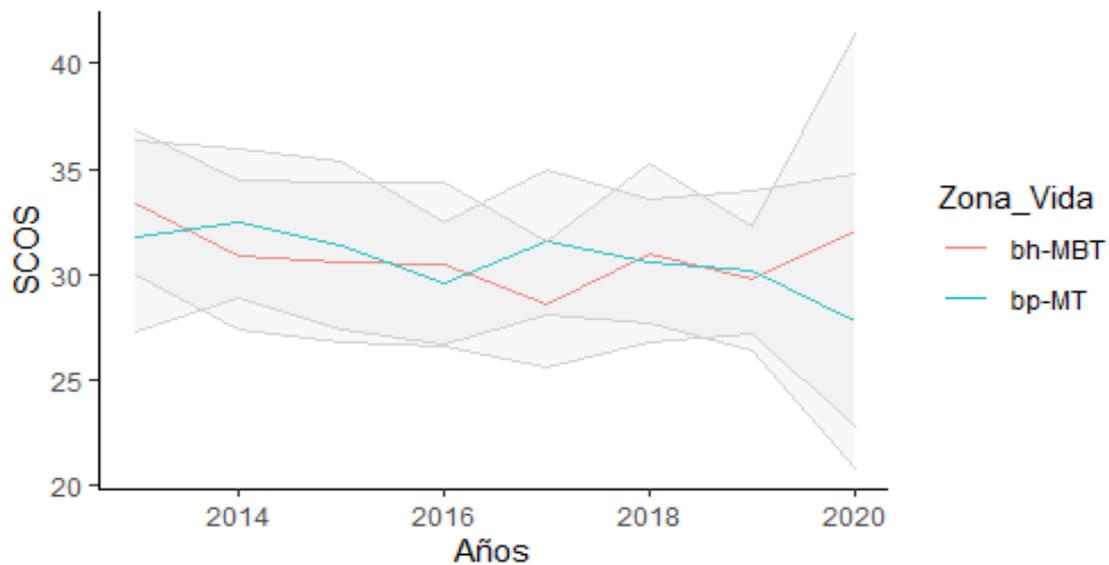


Nota: Los valores de %IncMSE fueron calculados considerando en cuanto se incrementa el error cuadrado medio al no incluir la variable predictora seleccionada, proceso de forma automática en el paquete randomforest.

Figura 11: Correlograma del porcentaje del incremento del error cuadrático medio (%IncMSE) del modelo Random Forest para SCOS y SPOXC.

4.4. Dinámica del Carbono entre el periodo 2013 al 2020

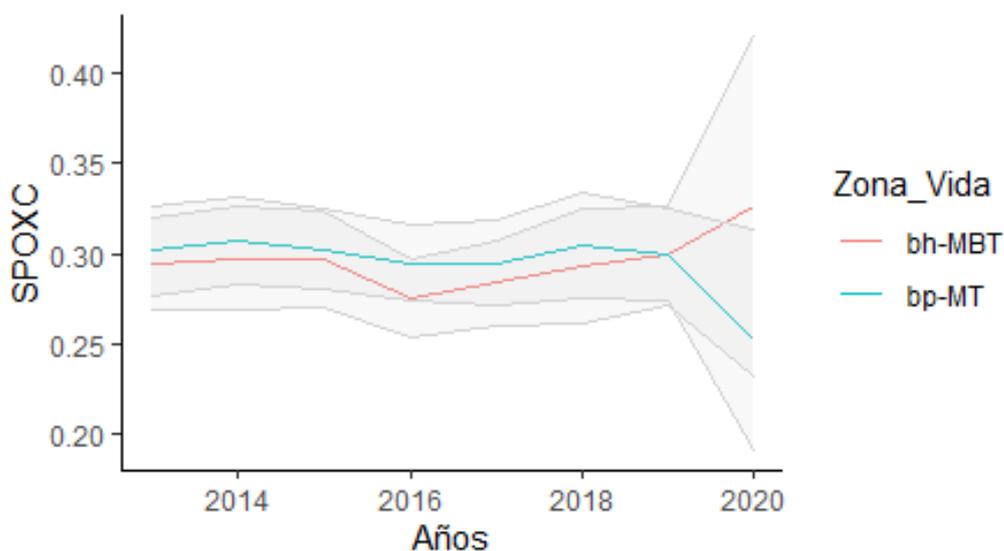
El modelo random forest fue aplicado sobre los datos promediados para los años 2013 hasta el 2020. La figura 12 muestra la tendencia central para cada ecosistema y la desviación estándar, es posible observar que se aprecia una línea casi continua horizontalmente desde el 2013 al 2020, con una ligera perturbación en el 2017. Además, el área cubierta por a la desviación estándar sigue el mismo patrón. Esto nos indica que la variación del stock de carbono orgánico total del suelo no tuvo cambios significativos en el tiempo.



Nota: Las líneas marcadas de color rojo es el valor promedio del SCOS para el ecosistema “Bosque húmedo Montano bajo tropical (bh-MBT), mientras que la línea marcada en color turquesa es el valor promedio del SCOS para el ecosistema “Bosque pluvial Montano tropical (bp-MT). La zona en gris representa el intervalo de confianza para esta dinámica (DSVS/2).

Figura 12: Dinámica del Stock de Carbono orgánico total del suelo (SCOS) entre los años 2013 al 2020.

De forma similar al stock de carbono orgánico total, la dinámica de carbono activo no presenta variaciones en el tiempo. En la figura 13 se observa una tendencia constante entre los años 2013 y 2020, pero existen ligeras diferencias entre los ecosistemas. La tendencia media del bosque húmedo tiende ser ligeramente inferior a la del bosque pluvial, información contraria a lo obtenido en la fecha de muestreo (2020-2021) en la cual el bosque pluvial tenía cantidades ligeramente inferiores de carbono activo. Sin embargo, las variaciones (zona sombreada) para el año 2020 son mucho mayores que para los otros años, por lo que no puede asegurarse que alguna de los ecosistemas tenga mayor o menos carbono activo.



Nota: Las líneas marcadas de color rojo es el valor promedio del SPOXC para el ecosistema “Bosque húmedo Montano bajo tropical (bh-MBT), mientras que la línea marcada en color turquesa es el valor promedio del SPOXC para el ecosistema “Bosque pluvial Montano tropical (bp-MT). La zona en gris representa el intervalo de confianza para esta dinámica (DSVS/2).

Figura 13: Dinámica del Stock de Carbono oxidable en Permanganato (SPOXC) entre los años 2013 al 2020.

El Área de conservación Tilacancha fue creada en el año 2010 (MINAM, 2010), a pesar de ser un área intangible, la deforestación, actividad agrícola y ganadera continuaron, según lo reportado, hasta el año 2016 (Salas et al., 2018). El implementar normativas para la conservación de ecosistemas naturales, no es suficiente para la mejora de estos, es necesario implementar prácticas de manejo y conservación de suelos que permitan el mejorar las condiciones del suelo. Gu et al., (2017) incorporaron el manejo de mulch en ecosistemas agrícolas degradados, consiguiendo un incremento de 14 y 21 por ciento del carbono orgánico total y activo durante un periodo de cuatro años. El manejo de mulch requiere que la población se involucre en la recolección, selección e incorporación del material vegetal para proteger la superficie del suelo. Winowiecki et al., (2016) sugiere una estrategia basada en el cambio de cobertura de la tierra, su experimento para Tanzania demostró que diferentes coberturas de la tierra tienden a acumular distintas cantidades de carbono orgánico del suelo y la información de la cobertura de la tierra obtenida por teledetección debe ser utilizada de forma estratégica para programar intervenciones en el ecosistema.

La figura 14 y 15 muestran el resultado de predecir los stocks de carbono orgánico total y activo sobre la zona de estudio con el modelo obtenido en la investigación. Se puede apreciar

que determinadas ubicaciones disminuyen los contenidos de carbono total y activo con el tiempo, mientras otras incrementan su contenido. Las zonas periféricas tienen un incremento en los contenidos de carbono del año 2013 al año 2020, posiblemente por la facilidad de acceso para su manejo con prácticas como la reforestación, mientras que las zonas internas tendieron a disminuir por la falta de intervención antrópica y posiblemente los estados de degradación por las actividades previas a la constitución del Área de Conservación. Consecuentemente el promedio total de la zona de estudio se mantiene constante.

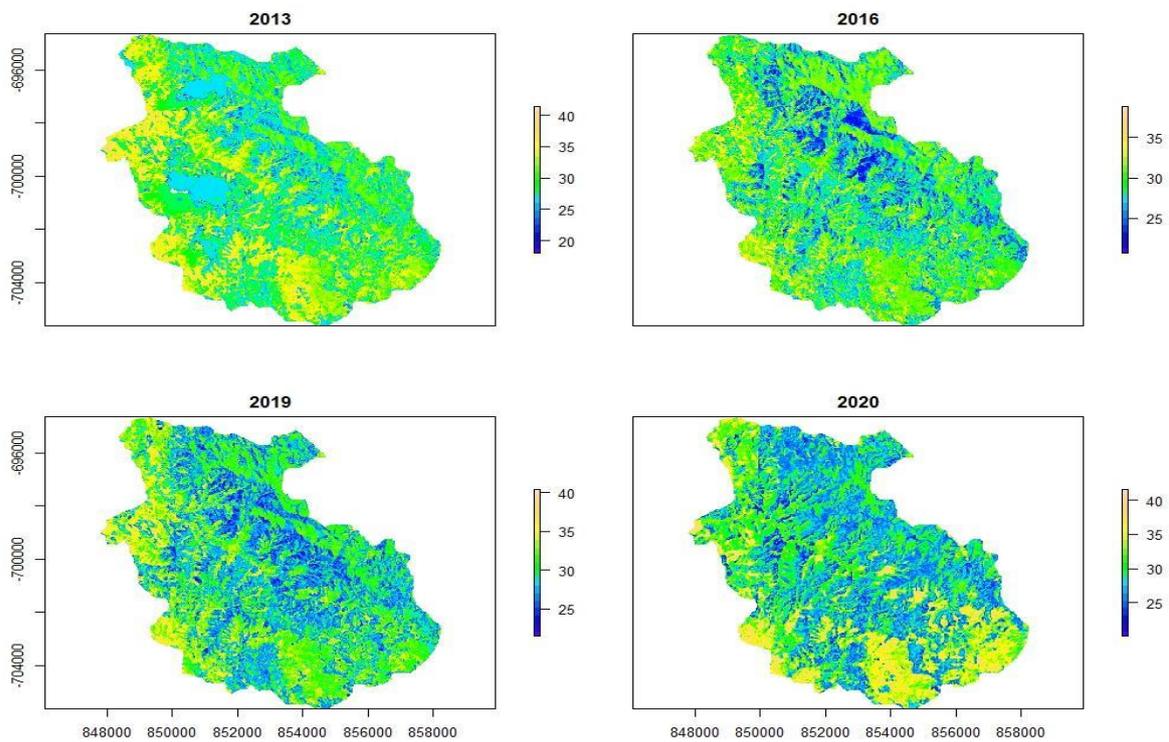


Figura 14: Stock de carbono orgánico total del Área de Conservación Privada Tilacancha.

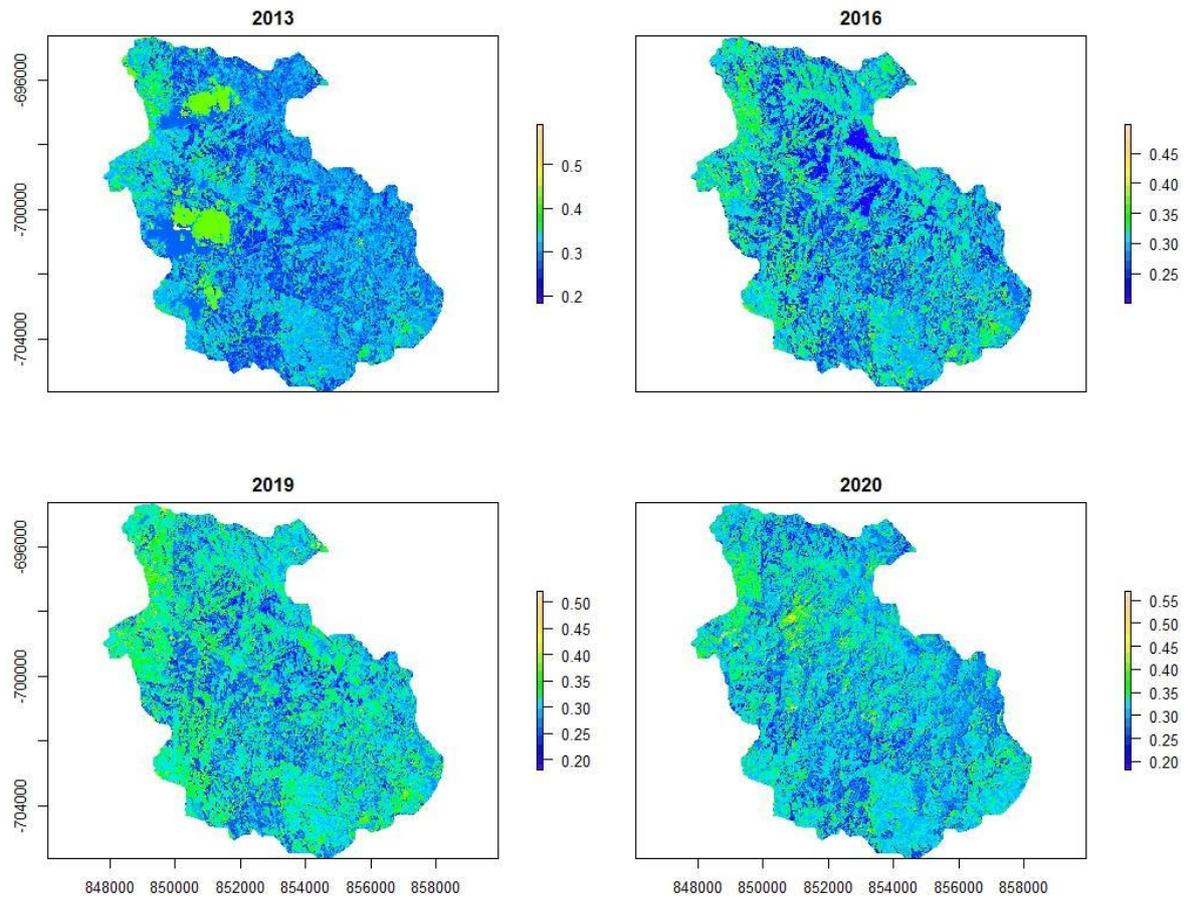


Figura 15: Stock de carbono orgánico activo del Área de Conservación Privada Tilacancha.

V. CONCLUSIONES

Se concluye que la dinámica de las reservas de carbono del suelo en los ecosistemas del Área de Conservación Privada Tilacancha se mantuvieron constantes desde el año 2013 al año 2020. Las reservas de carbono orgánico total del suelo fueron 1584.63 Gg en el bosque húmedo montano bajo tropical y 451.91 Gg en el bosque pluvial montano tropical. Estas representan la capacidad de almacenar el total de 1,178.44 toneladas de dióxido de carbono equivalente por hectárea en el ecosistema de bosque húmedo montano bajo tropical y de 1,020.63 toneladas de dióxido de carbono equivalente por hectárea en el ecosistema bosque pluvial montano tropical.

Por otro lado, el carbono activo representó el 1.03 por ciento de la reserva total de carbono en el bosque húmedo y 0.90 por ciento en el bosque pluvial. No se tuvieron diferencias en las reservas relativas de carbono activo entre los dos ecosistemas. Tanto el carbono orgánico total como el carbono activo tuvieron una dinámica constante desde el 2013 al 2020, por lo que se puede concluir que el ACP Tilacancha viene desempeñando un rol importante en el servicio de almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico y de manera estable.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para futuros estudios se identifique la cobertura de la tierra que tenga mayores reservas de carbono para orientar el cambio de cobertura a favor de la conservación de carbono.
- Incorporar prácticas de manejo y conservación de suelos son necesarias para el incremento de la captura de carbono, ya que el sólo delimitar el área de conservación no fue suficiente para generar cambios en las reservas de carbono entre los años 2013 y 2020.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Ahirwal, J., Nath, A., Brahma, B., Deb, S., Sahoo, U. K., & Nath, A. J. (2021). Patterns and driving factors of biomass carbon and soil organic carbon stock in the Indian Himalayan region. *Science of The Total Environment*, 770(S), 145292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145292>
- Akpa, S. I. C., Odeh, I. O. A., Bishop, T. F. A., Hartemink, A. E., & Amapu, I. Y. (2016). Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria. *Geoderma*, 271, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.021>
- Asociación Peruana para la Conservación de la Naturaleza (APECO) y MPCh (Municipalidad Provincial de Chachapoyas). 2008. *Expediente para el reconocimiento del área de conservación privada comunal Tilacancha*. Pp. 7-60.
- Bazán, R. 1996. Manual para el análisis químico de Suelos, Plantas y Aguas. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima – Perú. 73 pp
- Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., ... de Goede, R. 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38–50. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.12.00
- Broadbent, F.E. 1953. The soil organic fraction. *Advances in Agronomy* 5: 153 – 183. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60229-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60229-1).
- Culman, S. W., Hurisso, T. T., & Wade, J. 2021. Permanganate Oxidizable Carbon: An Indicator of Biologically Active Soil Carbon. *Laboratory Methods for Soil Health Analysis*, August, 152–175. <https://doi.org/10.1002/9780891189831.ch9>

- Enduring Resources for Earth Science Education (ERESE). 1998. *A Simplified Model of the Global Carbon Cycle [Archivo de datos]*. Disponible en: <https://earthref.org/ERDA/831/>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. doi:10.1002/joc.5086
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). s.f. *Soil carbon sequestration*. Disponible en: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/soil-carbon-sequestration/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*. Rome. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>
- Gu, C., Liu, Y., Mohamed, I., Zhang, R., Wang, X., Nie, X., Jiang, M., Brooks, M., Chen, F., & Li, Z. (2017). Correction: Dynamic Changes of Soil Surface Organic Carbon under Different Mulching Practices in Citrus Orchards on Sloping Land. *Plos One*, 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175600>
- Gutiérrez, J., Ordoñez, N., Bolívar, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C., Olmendo, G., Rodríguez, L., Sevilla, V., Vargas, R. 2020. Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas* 29(1):1855. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
- Haynes, R. J. 2005. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy*, 221–268. doi:10.1016/s0065-2113(04)85005-3

- Hernández, J. E., Tirado Torres, D., & Beltrán Hernández, R. I. 2014. Captura de carbono en los suelos. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 1(2). Disponible en: <https://doi.org/10.29057/icbi.v1i2.506>
- Hurisso, T. T.; Culman, S. W.; Horwath, W. R.; Wade, Jordon; Cass, Deandra; Beniston, Joshua W.; Bowles, Timothy M.; Grandy, A. Stuart; Franzluebbers, Alan J.; Schipanski, Meagan E.; Lucas, Shawn T. & Ugarte, Carmen M. (2016). Comparison of Permanganate-Oxidizable Carbon and Mineralizable Carbon for Assessment of Organic Matter Stabilization and Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1352. doi:10.2136/sssaj2016.04.0106
- International geosphere - Biosphere program (IGBP). 1998. *The terrestrial cycle: implications for the Kyoto protocol*. Science, 1393-1394.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press 377 pp. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0
- Jenny, H., 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Jensen, J.L., P. Schjøning, C.W. Watts, B.T. Christensen, C. Peltre, et al. 2019. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma* 337: 834–843. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.034.
- Jensen, J.L., P. Schjøning, C.W. Watts, B.T. Christensen, P.B. Obour, et al. 2020. Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability. *Geoderma* 364: 114181. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114181.
- Krull, E. S., Baldock, J. A., & Skjemstad, J. O. 2003. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 30(2), 207. doi:10.1071/fp02085

- Kutsch, W.; Bahn, M.; & Heinemeyer, A. (Eds.). 2010. *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511711794
- Lal, R., Kimble, J., Follet, R., & Cole, C. 1998. *The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Chelsea: Ann Arbor Press.
- Lao, C. 2017. *Fracciones del carbono orgánico lábil en suelos de la Amazonía peruana bajo diversos sistemas de uso*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio Institucional de la UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/2922/P33-L3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marques, J. D. de O., Luizão, F. J., Teixeira, W. G., Vitel, C. M., & Marques, E. M. de A. (2016). Soil organic carbon, carbon stock and their relationships to physical attributes under forest soils in central amazonia. *Revista Árvore*, 40(2), 197–208. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200002>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). 2010. Resolución Ministerial N° 118-2010-MINAM. Reconocen el Área de Conservación Privada Tilacancha. Disponible en: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/rm_118-2010-minam.pdf
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). 2010. Decreto Supremo N° 013-2010-AG. Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos. Disponible en: <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2010/ds13-2010-ag.pdf>
- McBratney, A.B.; Mendonça Santos, M.L.; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 0–52. doi:10.1016/s0016-7061(03)00223-4
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute. Disponible en: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>

- Ministerio de Agricultura y Riego (MIDAGRI); Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). 1995. Guía Explicativa del Mapa Ecológico del Perú. Lima, Perú.
- Nguemezi, C., Tematio, P., Silatsa, F. B. T., & Yemefack, M. (2021). Spatial variation and temporal decline (1985–2017) of soil organic carbon stocks (SOCS) in relation to land use types in Tombel area, South-West Cameroon. *Soil and Tillage Research*, 213, 105114. doi:10.1016/j.still.2021.105114
- Organización de las Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Kyoto, Japón. Págs. 25. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- RStudio Team, 2021. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC. Boston, MA. Disponible en: <http://www.rstudio.com/>
- Salas, R., Rojas, N. B., Mamani, J., & Rodriguez, N. Y. (2018). Deforestación en el área de conservación privada Tilacancha: zona de recarga hídrica y de abastecimiento de agua para Chachapoyas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2(2). <https://doi.org/10.25127/aps.20182.393>
- Sevink J. 2009. *Los páramos y sus reservas de carbono. En cuantificación y estimación de los stocks de carbono en ecosistemas de alta montaña*. Lima – Perú, Págs. 20.
- Statista. 2022. Concentración atmosférica de dióxido de carbono a nivel mundial 1959-2021. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/1269928/concentracion-atmosferica-global-de-dioxido-de-carbono/>
- Stiles, C.A., R.D. Hammer, M.G. Johnson, R. Ferguson, J. Galbraith, T. O’Geen, J.Arriaga, J. Shaw, A. Falen, P. McDaniel, and R. Miles. 2011. Validation Testing of a Portable Kit for Measuring an Active Soil Carbon Fraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*75:2330–2340. doi: 10.2136/sssaj2010.0350

- Szatmári, G., Pásztor, L., & Heuvelink, G. B. M. (2021). Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics. *Geoderma*, 403, 115356. doi:10.1016/j.geoderma.2021.11535
- Winowiecki, L., Vågen, T.-G., & Huising, J. (2016). Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: A spatial assessment of soil organic carbon. *Geoderma*, 263, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.010>
- Westman, C. J., Hytönen, J., & Wall, A. 2006. Loss-on-Ignition in the Determination of Pools of Organic Carbon in Soils of Forests and Afforested Arable Fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(7-8), 1059–1075. doi:10.1080/00103620600586292
- Zimmermann, M., Leifeld, J., & Fuhrer, J. (2007). Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(1), 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.010>

VIII. ANEXOS

Anexo N° 1: Identificación de covariables ambientales para el factor de formación.

Variables	Abreviación	Unidad	Descripción o detalle
Elevación	MDE	m.s.n.m.	Corregido con cotas de altitud
Pendiente	Slo	%	Método Zevenbergen y Thorne 1987
Orientación	As	°	
General curvature	GeC	s.u.	
Profile Curvature	PoC		
Plan Curvature	PaC		
Tangential Curvature	TaC		
Cross-Sectional Curvature	Csc		
Minimal Curvature	MiC		
Maximal Curvature	MaC		
Total Curvature	TTc		
Logitudinal Curvature	LoC		
Flow line curvature	FIC		
Protection Index	PTI		Radio 2000
Slope height	SHe		Sin modificaciones
Valley depth	VDp		Sin modificaciones
Normalized height	NHe		Sin modificaciones
Standarized height	StHe		Sin modificaciones
Mid-slope position	MsC		Sin modificaciones
Terrain Ruggedness Index (TRI)	TRI		Radius 10 weighting function IDW powder 2 TRUE offset and bandwidth 1
Analytical Hillshading			Method standar (90 degree) azimuth 315° height 45° exaggeration 4
Visible Sky	ViS		Radius 500, method multiscale, scale factor 2 and 8 sectors
Sky View Factor	SVF		
Direct Insolation	DrI		Constante solar =1367 W/m2
Diffuse Insolation	DfI		location from grid, range of days 01/01/2020 to 01/04/2020
Total Insolation	TTi		
Direct to diffuse ratio	DDR		
Acumulated annual precipitation	PPT	mm	Suma de todos los meses
Average annual temperature	TMA	°C	Promedio de todos los meses

Variable	Abreviación	Unidad	Descripción o detalle
Average daily radiation	RS	kJ m-2 day-1	Promedio de todos los meses
Soil Organic Carbon	SOC	g.kg-1	Sin modificaciones
Temperatura de brillo	BT_B10	°C	Banda 10 Landsat 8
Reflectancia de la superficie de la tierra B1-B7	SR_BX	s.u.	Landsat 8 descargada de EarthExplorer y reescalada *0.0001
Brightness	TcB	s.u.	Tasseled cap
Greenness	TcG		
Wetness	TcW		
Enhanced Vegetation Index	EVI	s.u.	With Landsat 8
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	s.u.	With Landsat 8
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	s.u.	With Landsat 8
Normalized Burn Ratio	NBR	s.u.	With Landsat 8
Visible to Short Wave infrared tendency index	VNSIR	s.u.	With Landsat 8
Reflectance ASTER L1T B1	AT_B1	s.u.	Corregida Dark Object Substraction en SCP de Qgis
Reflectance ASTER L1T B2	AT_B2		
Reflectance ASTER L1T B3	AT_B3		
Reflectance ASTER L1T B4	AT_B4		
Reflectance ASTER L1T B5	AT_B5		
Reflectance ASTER L1T B6	AT_B6		
Reflectance ASTER L1T B7	AT_B7		
Reflectance ASTER L1T B8	AT_B8		
Reflectance ASTER L1T B9	AT_B9		
Radiance ASTER L1T B10	AT_B10		
Radiance ASTER L1T B11	AT_B11		
Radiance ASTER L1T B12	AT_B12		
Radiance ASTER L1T B13	AT_B13		
Radiance ASTER L1T B14	AT_B14		

Anexo N° 2: Resultados del análisis de pH

Muestra	Prof. (cm)	ID	pH	Muestra	Prof. (cm)	ID	pH	Muestra	Prof. (cm)	ID	pH
M01	0-15	1	3.63	M16	0-15	31	4	M31	0-15	61	3.36
	15-30	2	3.48		15-30	32	3.41		15-30	62	3.27
M02	0-15	3	3.23	M17	0-15	33	3.67	M32	0-15	63	3.36
	15-30	4	3.35		15-30	34	3.25		15-30	64	3.51
M03	0-15	5	3.24	M18	0-15	35	3.4	M33	0-15	65	3.08
	15-30	6	3.09		15-30	36	3.24		15-30	66	3.34
M04	0-15	7	3.56	M19	0-15	37	3.28	M34	0-15	67	4.27
	15-30	8	3.34		15-30	38	3.42		15-30	68	4.59
M05	0-15	9	3.57	M20	0-15	39	4.18	M35	0-15	69	3.28
	15-30	10	3.8		15-30	40	4.28		15-30	70	3.19
M06	0-15	11	3.41	M21	0-15	41	4.53	M36	0-15	71	4.02
	15-30	12	3.36		15-30	42	4.43		15-30	72	3.87
M07	0-15	13	3.36	M22	0-15	43	3.34	M37	0-15	73	3.29
	15-30	14	3.55		15-30	44	3.56		15-30	74	3.52
M08	0-15	15	3.97	M23	0-15	45	2.94	M38	0-15	75	3.84
	15-30	16	3.34		15-30	46	3.19		15-30	76	4.37
M09	0-15	17	3.38	M24	0-15	47	3.38	M39	0-15	77	3.18
	15-30	18	3.25		15-30	48	3.36		15-30	78	2.92
M10	0-15	19	3.7	M25	0-15	49	3.35	M40	0-15	79	3.1
	15-30	20	3.55		15-30	50	3.39		15-30	80	3.06
M11	0-15	21	3.01	M26	0-15	51	3.38	M41	0-15	81	3.12
	15-30	22	3.51		15-30	52	3.31		15-30	82	3.67
M12	0-15	23	3.07	M27	0-15	53	3.29	M42	0-15	83	3.14
	15-30	24	3.25		15-30	54	3.27		15-30	84	3.21
M13	0-15	25	3.09	M28	0-15	55	3.28	M43	0-15	85	3.08
	15-30	26	3.2		15-30	56	3.68		15-30	86	3.26
M14	0-15	27	3.04	M29	0-15	57	3.64	M44	0-15	87	3.17
	15-30	28	3.34		15-30	58	3.81		15-30	88	2.84
M15	0-15	29	3.27	M30	0-15	59	3.35	M45	0-15	89	3.1
	15-30	30	3.41		15-30	60	3.41		15-30	90	3.04

Muestra	Prof. (cm)	ID	pH	Muestra	Prof. (cm)	ID	pH	Muestra	Prof. (cm)	ID	pH
M46	0-15	91	3.12	M61	0-15	121	3.41	M76	0-15	151	3.46
	15-30	92	2.99		15-30	122	3.08		15-30	152	3.27
M47	0-15	93	2.75	M62	0-15	123	3.15	M77	0-15	153	3.81
	15-30	94	2.76		15-30	124	3.18		15-30	154	3.4
M48	0-15	95	3.05	M63	0-15	125	3.22	M78	0-15	157	3.2
	15-30	96	3.03		15-30	126	3.34		15-30	158	3.24
M49	0-15	97	2.69	M64	0-15	127	3.11	M79	0-15	159	3.01
	15-30	98	2.98		15-30	128	3.3		15-30	160	3.01
M50	0-15	99	3.33	M65	0-15	129	3.29	M80	0-15	161	3
	15-30	100	3.02		15-30	130	3.33		15-30	162	3.18
M51	0-15	101	3.61	M66	0-15	131	2.7	M81	0-15	163	3.52
	15-30	102	3.18		15-30	132	3.18		15-30	164	3.29
M52	0-15	103	2.94	M67	0-15	133	3.05	M82	0-15	165	3.18
	15-30	104	2.96		15-30	134	3.08		15-30	166	3.24
M53	0-15	105	2.93	M68	0-15	135	3.02	M83	0-15	167	3.09
	15-30	106	2.87		15-30	136	3.79		15-30	168	3.01
M54	0-15	107	3.29	M69	0-15	137	3.47	M84	0-15	169	3.09
	15-30	108	3.08		15-30	138	3.39		15-30	170	3.22
M55	0-15	109	3.97	M70	0-15	139	3.33	M85	0-15	171	3.42
	15-30	110	3.68		15-30	140	3.32		15-30	172	3.2
M56	0-15	111	3.18	M71	0-15	141	3.52	M86	0-15	173	3.04
	15-30	112	3.16		15-30	142	3.44		15-30	174	3.12
M57	0-15	113	3.33	M72	0-15	143	4.02	M87	0-15	175	3.32
	15-30	114	3.39		15-30	144	3.18		15-30	176	3.03
M58	0-15	115	3.02	M73	0-15	145	3.31				
	15-30	116	3.02		15-30	146	3.37				
M59	0-15	117	3.13	M74	0-15	147	3.43				
	15-30	118	3.11		15-30	148	3.75				
M60	0-15	119	3.25	M75	0-15	149	3.49				
	15-30	120	3.57		15-30	150	3.58				

Anexo N° 3: Resultados del análisis de densidad aparente (da) por el método del terrón parafinado

Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)	Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)	Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)
M01	0-15	1	1.14	M16	0-15	31	1.33	M31	0-15	61	1.15
	15-30	2	1.27		15-30	32	1.15		15-30	62	1.52
M02	0-15	3	1.06	M17	0-15	33	1.09	M32	0-15	63	2.39
	15-30	4	1.08		15-30	34	1.25		15-30	64	1.23
M03	0-15	5	1.01	M18	0-15	35	1.12	M33	0-15	65	1.22
	15-30	6	1.19		15-30	36	1.41		15-30	66	1.46
M04	0-15	7	1.21	M19	0-15	37	1.18	M34	0-15	67	1.4
	15-30	8	1.09		15-30	38	1.41		15-30	68	1.3
M05	0-15	9	1.03	M20	0-15	39	1.21	M35	0-15	69	1.15
	15-30	10	1.23		15-30	40	1.12		15-30	70	1.38
M06	0-15	11	1.32	M21	0-15	41	0.97	M36	0-15	71	1.54
	15-30	12	0.99		15-30	42	1.11		15-30	72	1.58
M07	0-15	13	1.15	M22	0-15	43	0.79	M37	0-15	73	1.35
	15-30	14	1.11		15-30	44	1.05		15-30	74	1.56
M08	0-15	15	1.19	M23	0-15	45	0.85	M38	0-15	75	1.12
	15-30	16	1.34		15-30	46	1.32		15-30	76	1.7
M09	0-15	17	1.11	M24	0-15	47	1.37	M39	0-15	77	0.86
	15-30	18	1.33		15-30	48	1.15		15-30	78	1.15
M10	0-15	19	1.27	M25	0-15	49	1.27	M40	0-15	79	1.38
	15-30	20	1.36		15-30	50	1.42		15-30	80	1.47
M11	0-15	21	1.2	M26	0-15	51	1.22	M41	0-15	81	0.84
	15-30	22	1.09		15-30	52	1.48		15-30	82	1.48
M12	0-15	23	1.29	M27	0-15	53	1.46	M42	0-15	83	1.62
	15-30	24	1.2		15-30	54	1.55		15-30	84	1.88
M13	0-15	25	1.47	M28	0-15	55	1.07	M43	0-15	85	1.58
	15-30	26	1.3		15-30	56	1.09		15-30	86	1.61
M14	0-15	27	1.14	M29	0-15	57	1.42	M44	0-15	87	1.62
	15-30	28	1.3		15-30	58	0.85		15-30	88	1.73
M15	0-15	29	1.09	M30	0-15	59	1.11	M45	0-15	89	1.12
	15-30	30	1.47		15-30	60	1.81		15-30	90	1.42

Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)	Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)	Muestra	Prof. (cm)	ID	da (Mg/m3)
M46	0-15	91	1.31	M61	0-15	121	0.94	M76	0-15	151	0.96
	15-30	92	2.24		15-30	122	0.74		15-30	152	1
M47	0-15	93	1.31	M62	0-15	123	1.28	M77	0-15	153	0.84
	15-30	94	1.14		15-30	124	1.52		15-30	154	1.04
M48	0-15	95	1.19	M63	0-15	125	1.19	M78	0-15	157	1.4
	15-30	96	1.53		15-30	126	1.69		15-30	158	1.59
M49	0-15	97	0.64	M64	0-15	127	1.3	M79	0-15	159	1.16
	15-30	98	0.42		15-30	128	1.41		15-30	160	1.27
M50	0-15	99	1.19	M65	0-15	129	1.45	M80	0-15	161	1.18
	15-30	100	1.43		15-30	130	1.33		15-30	162	1.27
M51	0-15	101	0.85	M66	0-15	131	1.2	M81	0-15	163	1.17
	15-30	102	1.03		15-30	132	1.58		15-30	164	1.3
M52	0-15	103	1.27	M67	0-15	133	1.25	M82	0-15	165	1.18
	15-30	104	1.23		15-30	134	1.32		15-30	166	1.29
M53	0-15	105	0.94	M68	0-15	135	0.88	M83	0-15	167	1.17
	15-30	106	1.36		15-30	136	1.26		15-30	168	1.19
M54	0-15	107	1.37	M69	0-15	137	1.08	M84	0-15	169	1.44
	15-30	108	1.28		15-30	138	1.3		15-30	170	1.3
M55	0-15	109	1.1	M70	0-15	139	0.68	M85	0-15	171	1.25
	15-30	110	1.01		15-30	140	0.82		15-30	172	1.19
M56	0-15	111	0.93	M71	0-15	141	0.98	M86	0-15	173	1.32
	15-30	112	1.17		15-30	142	1.15		15-30	174	1.32
M57	0-15	113	0.87	M72	0-15	143	0.65	M87	0-15	175	1.2
	15-30	114	1.14		15-30	144	0.89		15-30	176	2.53
M58	0-15	115	1.04	M73	0-15	145	1.03				
	15-30	116	1.43		15-30	146	1.08				
M59	0-15	117	1.33	M74	0-15	147	1.35				
	15-30	118	1.51		15-30	148	1.52				
M60	0-15	119	1.3	M75	0-15	149	1.1				
	15-30	120	1.76		15-30	150	1.21				

Anexo N° 4: Resultados del análisis de materia orgánica por el método de calcinación (LOI)

Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufla (g)	MO_Mv %	Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufla (g)	MO_Mv %
M01	0-15	5.0	4.8	4.0	17.98	M15	0-15	5.0	4.9	3.8	21.86
	15-30	5.0	4.7	3.5	26.79		15-30	5.0	4.8	4.6	5.58
M02	0-15	5.0	4.8	3.6	25.31	M16	0-15	5.0	4.8	3.8	21.99
	15-30	5.0	4.8	4.3	10.71		15-30	5.0	4.9	4.6	4.54
M03	0-15	5.0	4.7	2.3	50.53	M17	0-15	5.0	4.9	4.1	16.80
	15-30	5.0	4.8	3.5	27.20		15-30	5.0	4.9	4.5	8.13
M04	0-15	5.0	4.8	3.7	22.13	M18	0-15	5.0	5.0	4.6	8.08
	15-30	5.0	4.8	3.9	18.26		15-30	5.2	5.0	4.7	6.39
M05	0-15	5.0	4.9	3.9	19.79	M19	0-15	5.0	4.9	4.3	12.80
	15-30	5.0	4.9	4.2	13.11		15-30	5.0	4.9	4.6	6.29
M06	0-15	5.0	4.9	3.8	21.03	M20	0-15	5.0	4.9	4.5	8.15
	15-30	5.0	4.9	3.8	21.03		15-30	5.0	5.0	4.7	4.85
M07	0-15	5.0	4.8	3.5	27.44	M21	0-15	5.0	4.9	4.7	5.87
	15-30	5.0	4.8	3.5	27.77		15-30	5.0	5.0	4.8	3.43
M08	0-15	5.0	4.9	4.4	11.13	M22	0-15	5.0	4.8	4.3	11.64
	15-30	5.0	5.0	4.7	4.44		15-30	5.0	4.9	4.3	10.52
M09	0-15	5.0	4.8	3.5	26.51	M23	0-15	5.0	4.8	3.8	21.74
	15-30	5.0	4.9	4.0	17.11		15-30	5.2	5.1	4.7	6.52
M10	0-15	5.0	4.9	4.6	6.75	M24	0-15	5.0	4.8	4.0	17.22
	15-30	5.0	4.9	4.5	6.97		15-30	5.1	4.9	4.6	4.94
M11	0-15	5.0	4.9	4.2	14.55	M25	0-15	5.0	4.8	3.6	23.53
	15-30	5.0	4.8	3.7	22.82		15-30	5.0	4.8	4.2	13.31
M12	0-15	5.0	4.8	3.9	19.09	M26	0-15	5.0	4.7	3.4	27.64
	15-30	5.0	4.9	4.4	9.39		15-30	5.0	4.8	4.4	8.70
M13	0-15	5.0	4.8	4.0	17.77	M27	0-15	5.0	4.7	3.2	32.77
	15-30	5.0	4.9	4.5	6.39		15-30	5.0	4.9	4.2	12.99
M14	0-15	5.0	4.9	3.9	19.96	M28	0-15	5.0	4.8	3.3	29.98
	15-30	5.0	4.9	4.6	5.35		15-30	5.0	4.9	4.4	9.59

Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufia (g)	MO_Mv %	Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufia (g)	MO_Mv %
M29	0-15	5.1	4.9	4.3	11.07	M44	0-15	5.0	4.8	3.6	23.37
	15-30	5.1	4.9	4.7	4.88		15-30	5.0	4.9	4.6	4.54
M30	0-15	5.0	4.7	3.8	20.08	M45	0-15	5.0	4.8	4.0	18.18
	15-30	5.0	4.7	4.3	9.09		15-30	5.0	4.9	4.7	4.49
M31	0-15	5.1	4.9	4.0	18.05	M46	0-15	5.0	4.6	3.4	26.03
	15-30	5.0	5.0	4.4	11.52		15-30	5.0	4.8	4.4	7.93
M32	0-15	5.0	4.8	3.7	22.34	M47	0-15	5.0	4.8	3.4	27.58
	15-30	5.0	4.8	3.7	22.90		15-30	5.0	4.8	4.3	11.98
M33	0-15	5.0	4.8	3.7	21.89	M48	0-15	5.0	4.9	4.2	13.37
	15-30	5.0	4.8	4.2	12.73		15-30	5.0	4.9	4.7	5.09
M34	0-15	5.0	4.9	4.7	4.29	M49	0-15	5.0	4.3	0.4	90.70
	15-30	5.2	5.0	4.9	2.79		15-30	5.0	4.6	1.9	59.26
M35	0-15	5.0	4.7	3.7	21.54	M50	0-15	5.3	4.9	4.7	4.66
	15-30	5.0	4.8	4.3	11.23		15-30	5.0	5.0	4.9	2.01
M36	0-15	5.0	4.9	4.5	7.94	M51	0-15	5.0	4.7	2.9	38.38
	15-30	5.0	4.9	4.7	3.87		15-30	5.0	4.9	4.5	8.76
M37	0-15	5.0	4.6	2.9	37.36	M52	0-15	5.0	4.8	4.1	15.32
	15-30	5.0	4.7	3.8	19.19		15-30	5.0	4.9	4.6	6.95
M38	0-15	5.0	4.8	4.0	17.33	M53	0-15	5.0	4.6	2.7	41.90
	15-30	5.0	4.9	4.4	10.63		15-30	5.0	4.8	4.3	11.41
M39	0-15	5.0	4.4	1.4	67.35	M54	0-15	5.0	4.7	3.7	21.44
	15-30	5.0	4.5	2.3	48.77		15-30	5.0	4.8	4.3	10.63
M40	0-15	5.0	4.8	4.0	17.18	M55	0-15	5.0	4.9	4.5	8.55
	15-30	5.0	4.9	4.6	5.14		15-30	5.0	4.9	4.6	5.70
M41	0-15	5.0	4.7	3.5	26.48	M56	0-15	5.1	4.8	4.0	16.70
	15-30	5.0	4.9	4.5	7.41		15-30	5.0	4.9	4.4	9.45
M42	0-15	5.0	4.8	4.0	16.95	M57	0-15	5.0	4.6	3.1	33.05
	15-30	5.0	4.7	4.5	5.51		15-30	5.0	4.7	4.0	14.77
M43	0-15	5.0	4.8	3.9	17.82	M58	0-15	5.0	4.9	4.3	12.07
	15-30	5.0	4.9	4.6	5.34		15-30	5.0	4.9	4.6	7.33

Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufla (g)	MO_Mv %	Muestra	Prof. (cm)	Muestra Fresca (g)	Muestra Estufa (g)	Muestra Mufla (g)	MO_Mv %
M59	0-15	5.0	4.7	3.5	25.75	M74	0-15	5.1	4.5	1.2	73.32
	15-30	5.0	4.7	4.1	13.29		15-30	5.0	4.5	2.3	49.33
M60	0-15	5.0	4.9	4.4	11.04	M75	0-15	5.1	4.9	4.4	10.79
	15-30	5.0	4.9	4.6	6.11		15-30	5.1	4.9	4.6	6.12
M61	0-15	5.0	4.5	1.3	71.88	M76	0-15	5.0	4.9	4.5	8.92
	15-30	5.0	4.5	1.7	62.19		15-30	5.0	5.0	4.9	2.81
M62	0-15	5.0	4.8	4.2	13.10	M77	0-15	5.1	4.7	3.2	33.05
	15-30	5.1	4.9	4.5	7.74		15-30	5.0	4.8	4.2	12.60
M63	0-15	5.0	4.9	4.4	10.98	M78	0-15	5.0	4.9	4.4	10.10
	15-30	5.1	5.1	5.0	1.98		15-30	5.0	4.9	4.6	5.75
M64	0-15	5.0	4.8	4.1	15.09	M79	0-15	5.1	4.9	4.2	15.18
	15-30	5.0	4.9	4.7	4.91		15-30	5.0	4.9	4.5	9.35
M65	0-15	5.1	4.9	4.4	9.98	M80	0-15	5.0	4.8	3.6	24.42
	15-30	5.0	4.9	4.8	3.24		15-30	5.0	4.9	4.1	15.43
M66	0-15	5.0	4.8	4.0	17.22	M81	0-15	8.0	4.9	4.1	14.81
	15-30	5.0	4.8	4.6	4.96		15-30	5.0	4.9	4.4	10.61
M67	0-15	5.1	4.8	4.1	15.08	M82	0-15	5.0	4.8	3.6	24.58
	15-30	5.0	4.9	4.6	5.52		15-30	6.0	4.8	4.1	15.98
M68	0-15	5.1	4.8	4.1	15.32	M83	0-15	5.0	4.9	4.1	16.63
	15-30	5.0	4.9	4.6	5.98		15-30	5.1	5.0	4.4	10.48
M69	0-15	5.0	4.8	4.1	14.38	M84	0-15	5.0	4.6	3.0	35.56
	15-30	5.0	4.8	4.4	8.88		15-30	5.0	4.7	3.5	25.37
M70	0-15	5.1	4.8	3.1	34.32	M85	0-15	5.0	4.8	3.7	23.22
	15-30	5.0	4.8	4.1	14.88		15-30	5.0	4.8	4.1	15.32
M71	0-15	5.0	4.8	4.3	12.01	M86	0-15	5.0	4.7	3.1	34.55
	15-30	5.0	4.9	4.7	4.07		15-30	5.0	4.7	3.5	25.69
M72	0-15	5.0	4.7	3.3	28.78	M87	0-15	5.0	4.8	3.6	24.48
	15-30	5.0	4.8	3.8	20.71		15-30	5.0	4.8	3.9	18.30
M73	0-15	5.1	4.8	4.1	15.45						
	15-30	5.0	4.8	4.4	9.52						

Anexo N° 5: Resultados del %Carbono orgánico obtenido por Walkley & Black

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS
M01	0-15	1	0.50	8.290	M16	0-15	31	0.50	16.8
	15-30	2	0.50	4.980		15-30	32	0.50	7.36
M02	0-15	3	0.25	17.760	M17	0-15	33	0.50	13.76
	15-30	4	0.50	5.660		15-30	34	0.50	8.32
M03	0-15	5	0.25	28.680	M18	0-15	35	0.50	9.6
	15-30	6	0.25	18.540		15-30	36	0.50	7.36
M04	0-15	7	0.25	14.440	M19	0-15	37	0.50	12.16
	15-30	8	0.50	8.980		15-30	38	0.50	8
M05	0-15	9	0.50	11.120	M20	0-15	39	0.50	9.44
	15-30	10	0.50	7.220		15-30	40	0.50	5.54
M06	0-15	11	0.50	11.320	M21	0-15	41	0.50	6.46
	15-30	12	0.25	10.930		15-30	42	0.50	5.17
M07	0-15	13	0.50	15.120	M22	0-15	43	0.50	9.32
	15-30	14	0.50	8.680		15-30	44	0.50	7.02
M08	0-15	15	0.50	7.120	M23	0-15	45	0.50	13.85
	15-30	16	0.50	3.120		15-30	46	0.50	3.88
M09	0-15	17	0.25	16.590	M24	0-15	47	0.50	9.42
	15-30	18	0.50	8.780		15-30	48	0.50	0.92
M10	0-15	19	0.50	4.880	M25	0-15	49	0.50	12
	15-30	20	0.50	4.250		15-30	50	0.50	8.68
M11	0-15	21	0.50	4.740	M26	0-15	51	0.50	15.69
	15-30	22	0.50	15.210		15-30	52	0.50	7.38
M12	0-15	23	0.50	10.270	M27	0-15	53	0.50	8.68
	15-30	24	0.50	6.120		15-30	54	0.50	8.86
M13	0-15	25	0.50	11.850	M28	0-15	55	0.50	20.22
	15-30	26	0.50	5.140		15-30	56	0.50	6.65
M14	0-15	27	0.50	11.850	M29	0-15	57	0.50	8.68
	15-30	28	0.50	4.150		15-30	58	0.50	0.49
M15	0-15	29	0.50	14.020	M30	0-15	59	0.50	7.87
	15-30	30	0.50	4.740		15-30	60	0.50	2.77

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS
M31	0-15	61	0.50	8.260	M46	0-15	91	0.50	11.9
	15-30	62	0.50	6.320		15-30	92	0.50	1.98
M32	0-15	63	0.50	9.230	M47	0-15	93	0.50	8.33
	15-30	64	0.50	2.180		15-30	94	0.50	6.35
M33	0-15	65	0.50	11.370	M48	0-15	95	0.50	7.93
	15-30	66	0.50	5.540		15-30	96	0.50	1.29
M34	0-15	67	0.50	1.850	M49	0-15	97	0.25	33.04
	15-30	68	0.50	1.070		15-30	98	0.25	34.29
M35	0-15	69	0.50	10.790	M50	0-15	99	0.50	3.77
	15-30	70	0.50	5.340		15-30	100	0.50	0.58
M36	0-15	71	0.50	3.600	M51	0-15	101	0.25	25.54
	15-30	72	0.50	1.460		15-30	102	0.50	3.09
M37	0-15	73	0.50	17.980	M52	0-15	103	0.50	6
	15-30	74	0.50	10.400		15-30	104	0.50	1.8
M38	0-15	75	0.50	8.360	M53	0-15	105	0.25	28.46
	15-30	76	0.50	0.680		15-30	106	0.50	4.2
M39	0-15	77	0.25	31.480	M54	0-15	107	0.50	8.57
	15-30	78	0.50	18.240		15-30	108	0.50	2.74
M40	0-15	79	0.50	10.120	M55	0-15	109	0.50	2.23
	15-30	80	0.50	2.980		15-30	110	0.50	0.69
M41	0-15	81	0.50	11.110	M56	0-15	111	0.50	5.66
	15-30	82	0.50	2.380		15-30	112	0.50	3.26
M42	0-15	83	0.50	7.140	M57	0-15	113	0.50	14.23
	15-30	84	0.50	1.980		15-30	114	0.50	4.46
M43	0-15	85	0.50	9.120	M58	0-15	115	0.50	6.34
	15-30	86	0.50	2.380		15-30	116	0.50	3.34
M44	0-15	87	0.50	13.090	M59	0-15	117	0.50	10.97
	15-30	88	0.50	13.880		15-30	118	0.50	4.63
M45	0-15	89	0.50	9.520	M60	0-15	119	0.50	31.17
	15-30	90	0.50	0.790		15-30	120	0.50	24.31

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	%COS
M61	0-15	121	0.50	31.170	M75	0-15	149	0.50	5.13
	15-30	122	0.50	24.310		15-30	150	0.50	2.56
M62	0-15	123	0.50	7.940	M76	0-15	151	0.50	4.86
	15-30	124	0.50	3.320		15-30	152	0.50	2.02
M63	0-15	125	0.50	7.940	M77	0-15	153	0.50	17.31
	15-30	126	0.50	2.400		15-30	154	0.50	6.32
M64	0-15	127	0.50	8.490	M78	0-15	157	0.50	4.21
	15-30	128	0.50	2.400		15-30	158	0.50	1.1
M65	0-15	129	0.50	6.460	M79	0-15	159	0.50	6.5
	15-30	130	0.50	2.220		15-30	160	0.50	3.48
M66	0-15	131	0.50	11.080	M80	0-15	161	0.50	11.18
	15-30	132	0.50	2.580		15-30	162	0.50	6.15
M67	0-15	133	0.50	9.050	M81	0-15	163	0.50	3.17
	15-30	134	0.50	3.690		15-30	164	0.25	4.36
M68	0-15	135	0.50	10.890	M82	0-15	165	0.25	7.14
	15-30	136	0.50	3.140		15-30	166	0.25	7.93
M69	0-15	137	0.50	9.140	M83	0-15	167	0.25	5.16
	15-30	138	0.50	10.150		15-30	168	0.25	5.55
M70	0-15	139	0.50	9.120	M84	0-15	169	0.25	9.72
	15-30	140	0.50	5.540		15-30	170	0.25	11.5
M71	0-15	141	0.50	6.600	M85	0-15	171	0.25	5.55
	15-30	142	0.50	1.650		15-30	172	0.25	8.73
M72	0-15	143	0.50	15.480	M86	0-15	173	0.25	9.52
	15-30	144	0.50	10.530		15-30	174	0.25	11.9
M73	0-15	145	0.50	6.960	M87	0-15	175	0.25	6.55
	15-30	146	0.50	3.390		15-30	176	0.25	9.12
M74	0-15	147	0.50	24.000					
	15-30	148	0.50	19.790					

Anexo N° 6: Resultados de carbono activo por oxidación en permanganato (KMnO4)

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)
M01	0-15	1	2.5	0.23	968.472	M16	0-15	31	1.5	0.504	1245.984
	15-30	2	2.5	0.246	942.782		15-30	32	2.5	0.858	165.960
M02	0-15	3	2.5	0.165	1072.836	M17	0-15	33	2.5	0.454	965.880
	15-30	4	2.5	0.552	451.469		15-30	34	2.5	0.787	306.540
M03	0-15	5	1	0.483	2206.908	M18	0-15	35	2.5	0.666	546.120
	15-30	6	2.5	0.502	531.749		15-30	36	2.5	0.78	320.400
M04	0-15	7	2.5	0.444	624.874	M19	0-15	37	2.5	0.581	714.420
	15-30	8	2.5	0.337	796.673		15-30	38	2.5	0.798	284.760
M05	0-15	9	2.5	0.401	693.914	M20	0-15	39	2.5	0.648	581.760
	15-30	10	2.5	0.557	443.441		15-30	40	2.5	0.785	310.500
M06	0-15	11	2.5	0.392	708.365	M21	0-15	41	2.5	0.716	447.120
	15-30	12	2.5	0.331	806.306		15-30	42	3.5	0.762	179.722
M07	0-15	13	1.5	0.411	1543.956	M22	0-15	43	2.5	0.756	367.920
	15-30	14	2.5	0.467	587.945		15-30	44	2.5	0.878	126.360
M08	0-15	15	2.5	0.495	542.988	M23	0-15	45	1.5	0.392	1604.832
	15-30	16	2.5	0.782	82.181		15-30	46	2.5	0.69	437.472
M09	0-15	17	2.5	0.368	746.899	M24	0-15	47	2.5	0.552	711.706
	15-30	18	2.5	0.605	366.372		15-30	48	2.5	0.844	131.443
M10	0-15	19	2.5	0.528	490.003	M25	0-15	49	1.5	0.477	1332.492
	15-30	20	2.5	0.454	608.818		15-30	50	2.5	0.646	524.909
M11	0-15	21	2.5	0.39	711.576	M26	0-15	51	2.5	0.702	413.626
	15-30	22	1.5	0.364	1694.544		15-30	52	2.5	0.8	218.880
M12	0-15	23	2.5	0.385	1102.500	M27	0-15	53	1.5	0.475	1338.900
	15-30	24	2.5	0.744	391.680		15-30	54	2.5	0.635	546.768
M13	0-15	25	2.5	0.441	991.620	M28	0-15	55	1	0.575	1680.300
	15-30	26	2.5	0.747	385.740		15-30	56	2.5	0.683	451.382
M14	0-15	27	2.5	0.452	969.840	M29	0-15	57	2.5	0.674	469.267
	15-30	28	2.5	0.772	336.240		15-30	58	5	0.803	75.046
M15	0-15	29	1.5	0.54	1130.640	M30	0-15	59	2.5	0.426	962.093
	15-30	30	2.5	0.63	617.400		15-30	60	2.5	0.713	391.766

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)
M31	0-15	61	1.5	0.37	1675.320	M46	0-15	91	1.5	0.511	1223.556
	15-30	62	1.5	0.39	1611.240		15-30	92	2.5	0.626	675.878
M32	0-15	63	1.5	0.463	1377.348	M47	0-15	93	1.5	0.476	1335.696
	15-30	64	2.5	0.72	377.856		15-30	94	1.5	0.536	1143.456
M33	0-15	65	1.5	0.467	1364.532	M48	0-15	95	1.5	0.608	912.768
	15-30	66	2.5	0.638	540.806		15-30	96	2.5	0.79	347.616
M34	0-15	67	2.5	0.783	252.662	M49	0-15	97	0.5	0.435	4963.320
	15-30	68	2.5	0.82	179.136		15-30	98	1.5	0.501	1231.428
M35	0-15	69	2.5	0.421	972.029	M50	0-15	99	2.5	0.711	505.742
	15-30	70	2.5	0.707	403.690		15-30	100	2.5	0.903	121.435
M36	0-15	71	2.5	0.537	741.514	M51	0-15	101	1.5	0.514	1187.592
	15-30	72	3.5	0.859	46.527		15-30	102	2.5	0.549	830.002
M37	0-15	73	1	0.482	2212.632	M52	0-15	103	2.5	0.525	878.040
	15-30	74	2.5	0.404	1005.811		15-30	104	2.5	0.815	297.576
M38	0-15	75	1.5	0.627	851.892	M53	0-15	105	1	0.387	2756.412
	15-30	76	2.5	0.874	71.827		15-30	106	2.5	0.733	461.707
M39	0-15	77	0.5	0.59	3188.880	M54	0-15	107	1.5	0.514	1187.592
	15-30	78	1	0.403	2664.828		15-30	108	2.5	0.687	553.781
M40	0-15	79	2.5	0.438	938.246	M55	0-15	109	2.5	0.539	850.018
	15-30	80	2.5	0.762	294.394		15-30	110	2.5	0.62	687.888
M41	0-15	81	1.5	0.57	1034.520	M56	0-15	111	1.5	0.601	894.228
	15-30	82	2.5	0.874	179.482		15-30	112	2.5	0.734	382.306
M42	0-15	83	1.5	0.598	944.808	M57	0-15	113	1.5	0.403	1561.884
	15-30	84	2.5	0.869	189.490		15-30	114	2.5	0.673	515.383
M43	0-15	85	2.5	0.464	1000.138	M58	0-15	115	2.5	0.543	798.991
	15-30	86	2.5	0.881	165.470		15-30	116	2.5	0.733	384.487
M44	0-15	87	1.5	0.504	1245.984	M59	0-15	117	1.5	0.569	1002.132
	15-30	88	2.5	0.644	639.850		15-30	118	3.5	0.658	300.867
M45	0-15	89	1.5	0.563	1056.948	M60	0-15	119	2.5	0.594	687.730
	15-30	90	2.5	0.775	377.640		15-30	120	3.5	0.851	21.955

Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)	Muestra	Prof. (cm)	ID	Muestra (g)	Abs	POXC (mg/kg)
M61	0-15	121	0.5	0.447	4825.944	M75	0-15	149	2.5	0.519	812.146
	15-30	122	0.5	0.347	5970.744		15-30	150	2.5	0.737	407.189
M62	0-15	123	2.5	0.472	953.885	M76	0-15	151	1.5	0.553	1056.084
	15-30	124	2.5	0.747	353.945		15-30	152	2.5	0.86	178.704
M63	0-15	125	1.5	0.592	924.576	M77	0-15	153	1.5	0.474	1322.472
	15-30	126	5	0.781	100.231		15-30	154	2.5	0.438	962.611
M64	0-15	127	2.5	0.547	790.265	M78	0-15	157	2.5	0.675	522.360
	15-30	128	2.5	0.814	207.778		15-30	158	2.5	0.854	189.850
M65	0-15	129	2.5	0.537	812.081	M79	0-15	159	2.5	0.586	687.686
	15-30	130	3.5	0.851	21.955		15-30	160	2.5	0.744	394.186
M66	0-15	131	2.5	0.511	868.802	M80	0-15	161	0.5	0.731	1574.712
	15-30	132	2.5	0.793	253.591		15-30	162	2.5	0.664	542.794
M67	0-15	133	2.5	0.504	884.074	M81	0-15	163	2.5	0.57	717.408
	15-30	134	2.5	0.64	587.376		15-30	164	2.5	0.813	266.011
M68	0-15	135	2.5	0.48	936.432	M82	0-15	165	2.5	0.419	997.906
	15-30	136	2.5	0.85	197.280		15-30	166	2.5	0.644	579.946
M69	0-15	137	1.5	0.617	840.276	M83	0-15	167	2.5	0.413	1009.051
	15-30	138	2.5	0.686	501.926		15-30	168	2.5	0.637	592.949
M70	0-15	139	2.5	0.3	1218.960	M84	0-15	169	2.5	0.205	1395.432
	15-30	140	1.5	0.485	1285.380		15-30	170	2.5	0.528	795.427
M71	0-15	141	2.5	0.542	769.421	M85	0-15	171	2.5	0.408	1018.339
	15-30	142	2.5	0.8	290.160		15-30	172	2.5	0.583	693.259
M72	0-15	143	1.5	0.288	1949.664	M86	0-15	173	2.5	0.409	1016.482
	15-30	144	2.5	0.27	1274.688		15-30	174	2.5	0.619	626.386
M73	0-15	145	2.5	0.484	877.162	M87	0-15	175	1.5	0.53	1133.640
	15-30	146	2.5	0.788	312.451		15-30	176	2.5	0.509	830.722
M74	0-15	147	0.5	0.448	4814.496						
	15-30	148	0.5	0.566	3463.632						

Anexo N° 7: Carbono total (%), carbono activo, STOCK_COS y STOC_POXC a los primeros 30 cm de profundidad de los puntos de muestreo.

Muestra	Coordenadas		Ecosistema	Carbono total (%)	STOCK_COS (SCOS)	Carbono activo (mg/kg)	STOCK_POXC (SPOXC)
	X	Y					
M01	187058	9301130	bh-MBT	6.634	23.659	955.627	0.345
M02	188953	9299699	bp-MT	11.707	37.399	762.152	0.244
M03	188636	9300029	bh-MBT	23.610	73.530	1369.328	0.406
M04	187970	9300591	bh-MBT	11.707	39.858	710.773	0.239
M05	186905	9301355	bh-MBT	9.171	30.503	568.678	0.189
M06	186750	9301666	bh-MBT	11.122	38.634	757.336	0.260
M07	186358	9301924	bh-MBT	11.902	40.542	1065.950	0.364
M08	187349	9299258	bh-MBT	5.122	18.988	312.584	0.113
M09	187204	9299218	bh-MBT	12.683	45.132	556.636	0.197
M10	186667	9299220	bh-MBT	4.562	17.956	549.410	0.218
M11	186236	9298790	bh-MBT	9.975	33.401	1203.060	0.405
M12	185711	9298731	bh-MBT	8.198	30.898	747.090	0.284
M13	188531	9298579	bp-MT	8.494	36.148	688.680	0.294
M14	188558	9298542	bp-MT	8.000	28.356	653.040	0.231
M15	188785	9298413	bp-MT	9.383	33.384	874.020	0.321
M16	188678	9298447	bp-MT	12.080	46.212	705.972	0.277
M17	188504	9298640	bp-MT	11.040	38.098	636.210	0.215
M18	188435	9298691	bp-MT	8.480	31.694	433.260	0.160
M19	188438	9298585	bp-MT	10.080	38.443	499.590	0.187
M20	189842	9298122	bp-MT	7.489	26.438	446.130	0.158
M21	189700	9298235	bp-MT	5.815	18.883	313.421	0.098
M22	189935	9298168	bp-MT	8.169	22.097	247.140	0.064
M23	189952	9298120	bp-MT	8.862	25.330	1021.152	0.291
M24	190160	9298202	bp-MT	5.169	20.941	421.574	0.169
M25	189909	9297934	bp-MT	10.338	41.342	928.700	0.366
M26	190222	9298362	bp-MT	11.538	45.111	316.253	0.124
M27	190123	9297943	bp-MT	8.769	39.605	942.834	0.420
M28	190251	9298455	bp-MT	13.431	44.655	1065.841	0.353
M29	190419	9297801	bp-MT	4.581	19.101	272.156	0.110
M30	190345	9298302	bp-MT	5.320	20.625	676.930	0.267

Muestra	Coordenadas		Ecosistema	Carbono total (%)	STOCK_COS (SCOS)	Carbono activo (mg/kg)	STOCK_POXC (SPOXC)
	X	Y					
M31	190429	9297827	bp-MT	7.287	28.647	1643.280	0.656
M32	190252	9298092	bp-MT	5.705	21.167	877.602	0.326
M33	189699	9297594	bh-MBT	8.453	32.361	952.669	0.361
M34	190120	9298031	bp-MT	1.458	5.937	215.899	0.088
M35	190102	9297470	bh-MBT	8.065	29.667	687.859	0.251
M36	189832	9298203	bp-MT	2.526	11.142	394.021	0.180
M37	190378	9297338	bh-MBT	14.186	60.729	1609.222	0.683
M38	189594	9297836	bp-MT	4.518	15.533	461.860	0.159
M39	190736	9297214	bh-MBT	24.860	72.110	2926.854	0.872
M40	189446	9297689	bh-MBT	6.545	27.500	616.320	0.259
M41	190899	9297390	bh-MBT	6.744	24.596	607.001	0.220
M42	189788	9297550	bh-MBT	4.562	22.945	567.149	0.283
M43	190361	9297247	bh-MBT	5.752	27.372	582.804	0.277
M44	189990	9297511	bh-MBT	13.488	67.841	942.917	0.469
M45	191933	9298055	bp-MT	5.157	17.600	717.294	0.254
M46	190279	9297378	bh-MBT	6.942	26.122	949.717	0.383
M47	192199	9298051	bp-MT	7.339	27.223	1239.576	0.458
M48	189012	9297930	bp-MT	4.612	17.123	630.192	0.243
M49	192104	9298801	bp-MT	33.663	78.044	1924.374	0.418
M50	188514	9298114	bp-MT	2.176	7.976	313.589	0.116
M51	192073	9298999	bp-MT	14.314	37.335	1356.113	0.368
M52	188188	9298479	bp-MT	3.900	14.751	587.808	0.222
M53	191609	9298767	bp-MT	16.329	48.693	1609.060	0.483
M54	187983	9298813	bh-MBT	5.657	22.881	870.686	0.350
M55	191556	9297559	bp-MT	1.457	4.716	552.931	0.179
M56	187470	9299194	bh-MBT	4.457	13.608	638.267	0.192
M57	191510	9297203	bp-MT	9.343	33.693	1038.634	0.375
M58	191813	9298056	bp-MT	4.843	17.065	591.739	0.207
M59	191532	9296936	bp-MT	7.800	32.372	651.500	0.268
M60	192055	9298602	bp-MT	2.829	12.687	354.842	0.140

Muestra	Coordenadas		Ecosistema	Carbono total (%)	STOCK_COS (SCOS)	Carbono activo (mg/kg)	STOCK_POXC (SPOXC)
	X	Y					
M61	191057	9296923	bh-MBT	27.740	70.934	2792.664	0.703
M62	191871	9298701	bp-MT	5.631	22.819	653.915	0.264
M63	189262	9295598	bh-MBT	5.169	20.254	512.404	0.190
M64	191848	9298918	bp-MT	5.446	21.636	499.021	0.198
M65	188484	9295525	bh-MBT	4.338	18.473	417.018	0.181
M66	191438	9298636	bp-MT	6.831	25.545	561.197	0.212
M67	188372	9295719	bh-MBT	6.369	24.272	735.725	0.282
M68	191870	9298224	bp-MT	7.015	24.802	566.856	0.200
M69	188615	9295809	bh-MBT	9.646	34.604	671.101	0.234
M70	190837	9297030	bh-MBT	7.331	19.422	1252.170	0.359
M71	188691	9295969	bh-MBT	4.122	12.540	529.790	0.163
M72	188999	9296485	bh-MBT	13.008	29.157	1612.176	0.360
M73	188574	9296152	bh-MBT	5.176	16.247	594.806	0.186
M74	188928	9296631	bh-MBT	21.895	93.721	2583.600	1.109
M75	188432	9296152	bh-MBT	3.847	13.119	609.667	0.208
M76	189246	9297558	bh-MBT	3.435	10.014	617.394	0.179
M77	189018	9296333	bh-MBT	11.817	31.675	1142.542	0.317
M78	187695	9304836	bh-MBT	2.656	11.470	356.105	0.155
M79	188076	9304618	bh-MBT	4.992	17.948	540.936	0.195
M80	188280	9304466	bh-MBT	8.662	31.494	1058.753	0.382
M81	188432	9304301	bh-MBT	3.769	14.079	491.710	0.178
M82	188535	9304117	bh-MBT	7.537	27.991	788.926	0.289
M83	188691	9303960	bh-MBT	5.355	18.964	801.000	0.283
M84	188827	9303705	bh-MBT	10.612	43.426	1095.430	0.457
M85	189011	9303457	bh-MBT	7.141	25.991	855.799	0.315
M86	189126	9303266	bh-MBT	10.711	42.415	821.434	0.325
M87	189193	9303027	bh-MBT	7.835	27.936	982.181	0.351

Donde:

- bh-MBT: Bosque húmedo montano bajo tropical
- bp-MT: Bosque pluvial monte tropical

Anexo N° 8: Overall del VarImp de las variables SCOS y SPOXC

var	%IncMSE	
	SCOS	SPOXC
ls_blue	0.969728	5.607302
ls_green	4.396525	6.458698
ls_nir	1.848918	1.697125
ls_red	5.126896	8.327021
ls_swir1	4.904625	5.631486
ls_swir2	9.223343	10.39897

Anexo N° 9: Stocks promedios de COS y POXC predichas por el modelo para los años 2013 al 2020 según ecosistema

Zona_Vida	Año	STOCK_COS	STOCK_POXC
bp-MT	2013	31.7954	0.3020
	2014	32.4440	0.3072
	2015	31.3531	0.3028
	2016	29.5903	0.2951
	2017	31.5304	0.2950
	2018	30.6042	0.3048
	2019	30.1854	0.2995
	2020	27.8138	0.2527
bh-MBT	2013	33.4009	0.2951
	2014	30.9121	0.2976
	2015	30.5649	0.2972
	2016	30.4648	0.2760
	2017	28.5588	0.2838
	2018	30.9929	0.2933
	2019	29.7406	0.2992
	2020	32.1083	0.3266

NOTA: Valores en $kg * m^{-2}$

Anexo N° 10: Modelos randomforest de predicción para SCOS

> MD

Call:

```
randomForest(formula = STOCK_COS ~ ls_blue + ls_green + ls_nir + ls_red + ls_swirl1 + ls_swirl2, data = DF_TimeSeries, ntree = 200, mtry = 2, importance = TRUE)
```

Type of random forest: regression

Number of trees: 200

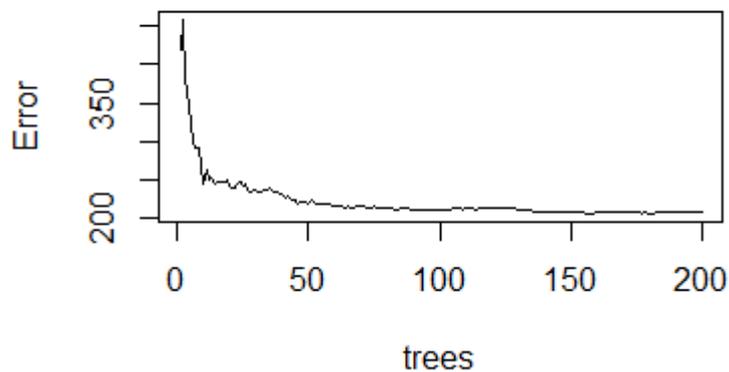
No. of variables tried at each split: 2

Mean of squared residuals: 3.217873

% Var explained: 84.73

Anexo N° 11: Diagrama de correlación del error según la formación de árboles para SCOS

MD



Anexo N° 12: Modelos randomforest de predicción para POXC

Call:

```
randomForest(formula = STOCK_POXC ~ ls_blue + ls_green + ls_nir + ls_red + ls_swirl + ls_swir2,  
data = DF_TimeSeries, ntree = 300, mtry = 2, importance = TRUE)  
Type of random forest: regression
```

Number of trees: 300

No. of variables tried at each split: 2

Mean of squared residuals: 0.0004211484

% Var explained: 78.01

Anexo N° 13: Diagrama de correlación del error según la formación de árboles para SCOS

MD1

