

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE**  
**SUELOS Y AGUA**



**CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO DE UN BOSQUE INTERVENIDO Y UN**  
**SISTEMA AGROFORESTAL EN EL CASERÍO PUERTO ALIANZA, DISTRITO DE**  
**SANTA ROSA DE ALTO YANAJANCA, PROVINCIA DE MARAÑÓN**

**TESIS**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**

**Presentado por:**

**MARILITA VILCA ROJAS**

**TINGO MARÍA – PERÚ**

**2025**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 013-2026-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de diciembre de 2025, a horas 11:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO DE UN BOSQUE INTERVENIDO Y UN SISTEMA AGROFORESTAL EN EL CASERÍO PUERTO ALIANZA, DISTRITO DE SANTA ROSA DE ALTO YANAJANCA, PROVINCIA DE MARAÑÓN”**

Presentado por la Bachiller: **VILCA ROJAS, MARILITA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 06 de febrero de 2026

  
Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO  
PRESIDENTE

  
Ing. MSc. MARCO ANTONIO DUEÑAS TUESTA  
MIEMBRO

  
Ing. MSc. ERLE OTTO J. BUSTAMANTE SCAGLIONI  
MIEMBRO

  
Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ  
ASESOR





UNAS

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 094 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis X Trabajo de Suficiencia Profesional

Table with 4 columns: TÍTULO, AUTOR, SIMILITUD, and CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Row 1: CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO DE UN BOSQUE INTERVENIDO Y UN SISTEMA AGROFORESTAL EN EL CASERÍO PUERTO ALIANZA, DISTRITO DE SANTA ROSA DE ALTO YANAJANCA, PROVINCIA DE MARAÑÓN; MARILITA VILCA ROJAS; 15 % Quince; Menor a 20 %

Tingo María, 20 de marzo de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTIFICO
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN**  
**CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**



**CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO DE UN BOSQUE INTERVENIDO Y UN SISTEMA AGROFORESTAL EN EL CASERÍO PUERTO ALIANZA, DISTRITO DE SANTA ROSA DE ALTO YANAJANCA, PROVINCIA DE MARAÑÓN**

Autor : Br. Vilca Rojas, Marilita  
Asesor : Dr. Manrique De Lara Suarez, Lucio  
Área de investigación : Ciencias básicas  
Grupo de investigación : Ciencias básicas  
Línea de investigación : Ecología y conservación de suelos  
Lugar de ejecución : Caserío Puerto Alianza  
Duración del trabajo :  
Fecha de inicio : 05 de febrero del 2025  
Termino : 05 de agosto del 2025  
Financiamiento : S/. 4104.10  
FEDU : No  
PROPIO : Si  
OTROS : No

Tingo María – Perú

2025

## DEDICATORIA

A Dios, fuente infinita de sabiduría y fortaleza, gracias por guiar mis pasos en cada momento de este camino. Por ser mi luz en los momentos de incertidumbre y por darme la perseverancia para alcanzar esta meta. Que esta tesis sea un testimonio de gratitud por tu amor y fidelidad incondicionales.

A mis padres y hermanos, pilares fundamentales de mi vida, les dedico con todo mi corazón este logro. Gracias por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Cada sacrificio, cada consejo y cada sonrisa han sido el motor que me impulsó a seguir adelante. Esta tesis es también suya, porque sin ustedes, nada de esto habría sido posible

## **AGRADECIMIENTO**

- A mi alma mater, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, institución que forjó mi formación académica y profesional. Gracias por brindarme las herramientas, los conocimientos y los valores que hoy me permiten alcanzar este logro.
- A los docentes de la carrera profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua, quienes con dedicación y pasión compartieron sus saberes y experiencias.
- Al Dr. Lucio Manrique De Lara Suarez, mi asesor, por su invaluable guía, paciencia y apoyo durante todo el proceso de investigación. Sus conocimientos, críticas constructivas y motivación fueron fundamentales para culminar este trabajo.
- A mis jurados evaluadores, por honrarme con su tiempo, experiencia y valiosas aportaciones para enriquecer esta tesis.

## ÍNDICE

Contenido	Página
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico .....	3
2.1.1. Cambio climático .....	3
2.1.2. Calentamiento global .....	4
2.1.3. Protocolo de Kioto .....	7
2.1.4. Composición de un bosque intervenido y un sistema agroforestal.....	8
2.1.5. El carbono y el ciclo del carbono.....	9
2.1.6. Suelos amazónicos .....	10
2.1.7. Carbono y materia orgánica en el suelo.....	11
2.1.8. Fijación de carbono.....	13
2.1.9. Factores que influyen el secuestro de carbono en el suelo.....	15
2.2. Estado del arte.....	16
2.2.1. Antecedentes.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
3.1. Lugar de ejecución .....	19
3.1.1. Procesamiento de las muestras .....	20
3.1.2. Condiciones climáticas .....	20
3.1.3. Morfología .....	20
3.1.4. Zonas de vida .....	21
3.2. Materiales y métodos .....	21
3.2.1. Materiales.....	21
3.2.2. Equipos .....	21
3.2.3. Metodología.....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1. Contenido de carbono almacenado en el suelo .....	30
4.1.1. Hojarasca .....	30
4.1.2. Suelo .....	32

4.1.3. Raíces.....	36
4.2. Contenido de carbono total almacenado en el suelo.....	39
4.3. Contenido de dióxido de carbono almacenado en el suelo.....	42
V. CONCLUSIONES .....	45
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	46
VII. REFERENCIAS .....	47
ANEXOS.....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Distribución de C Orgánico del Suelo (por Ecosistemas).....	13
2. Descripción de las áreas de estudio .....	19
3. Propiedades del suelo del área de estudio. ....	20
4. Operacionalización de variables.....	22
5. Matriz de consistencia de la investigación.....	23
6. Estadísticos del carbono almacenado en las hojarascas .....	30
7. Prueba de Levene para el carbono almacenado en las hojarascas.....	31
8. Prueba T de Student para el carbono almacenado en las hojarascas.....	31
9. Estadísticos del carbono orgánico almacenado en el suelo .....	33
10. Prueba de Levene para el carbono almacenado en el suelo.....	34
11. Prueba T de Student para el carbono almacenado en el suelo.....	34
12. Estadísticos del carbono almacenado en las raíces.....	36
13. Prueba de Levene para el carbono almacenado en las raíces .....	37
14. Prueba T de Student para el carbono almacenado en las raíces .....	37
15. Estadísticos del carbono total almacenado en el suelo.....	39
16. Prueba de Levene para el carbono total almacenado en el suelo .....	40
17. Prueba T de Student para el carbono total almacenado en el suelo.....	41
18. Estadísticos del dióxido de carbono almacenado en el suelo .....	42
19. Prueba de Levene para el dióxido de carbono almacenado en el suelo.....	43
20. Prueba T de Student para el dióxido de carbono almacenado en el suelo.....	44
21. Ficha de registro para raíz .....	55
22. Ficha de registro para hojarasca .....	56
23. Carbono en las hojarascas del bosque intervenido en la parcela A.....	57
24. Carbono en las raíces del bosque intervenido en la parcela A .....	57
25. Carbono orgánico del suelo del bosque intervenido pastizal en la parcela A .....	57
26. Carbono en las hojarascas del bosque intervenido en la parcela B .....	58
27. Carbono en las raíces del bosque intervenido en la parcela B .....	58
28. Carbono orgánico del suelo del bosque intervenido pastizal en la parcela B .....	58
29. Carbono en las hojarascas del sistema agroforestal en la parcela C.....	59
30. Carbono en las raíces del sistema agroforestal en la parcela C.....	59
31. Carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal en la parcela C .....	59

32. Carbono en las hojarascas del sistema agroforestal en la parcela D .....	60
33. Carbono en las raíces del sistema agroforestal en la parcela D.....	60
34. Carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal en la parcela D.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Efecto invernadero .....	4
2. Distribución de emisiones del país por GEI .....	7
3. Ciclo del carbono.....	10
4. Carbono del suelo y el carbono global .....	12
5. Fijación de carbono .....	14
6. Factores que afectan el secuestro de carbono en el suelo.....	16
7. Ubicación del proyecto.....	19
8. Diseño de la investigación.....	22
9. Detalle de parcela en estudio .....	24
10. Detalle de cuadrantes interiores de 0,5 m x 0,5 m para la medición del carbono en la biomasa seca.....	26
11. Detalle de cuadrantes interiores de 0,3 m x 0,3 m para la medición del carbono en el suelo.....	27
12. Diagrama de la toma de muestra para el suelo.....	27
13. Diagrama de la toma de muestra para las raíces.....	28
14. Comparación de medias del carbono almacenado en las hojarascas.....	30
15. Comparación de medias del carbono almacenado en el suelo .....	33
16. Comparación de medias del carbono almacenado en las raíces .....	36
17. Comparación de medias del carbono total almacenado en el suelo .....	39
18. Comparación de medias del dióxido de carbono almacenado en el suelo .....	43
19. Mapa de ubicación.....	54
20. Análisis de laboratorio de materia orgánica .....	61
21. Análisis de laboratorio general de suelo.....	62
22. Bosque intervenido .....	63
23. Sistema agroforestal .....	63
24. Delimitación de la parcela en el bosque intervenido.....	64
25. Toma de muestra de suelo .....	64
26. Medición de la profundidad para la toma de muestra .....	65
27. Toma de muestra de hojarasca .....	65
28. Pesaje de las muestras de hojarascas .....	66
29. Muestras de hojarascas en el horno .....	66

30. Separación de las raíces del suelo .....	67
31. Muestras de raíces en el horno .....	67

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo estimar el carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el Caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca (Perú). El estudio se realizó mediante un diseño comparativo no experimental para evaluar la biomasa sobre y bajo el suelo (hojarasca, raíces y carbono orgánico del suelo). La metodología comprendió el establecimiento de parcelas de muestreo estratificado y análisis de laboratorio especializados para la cuantificación del carbono orgánico en cada compartimento evaluado. Los resultados evidenciaron que el bosque intervenido presentó una capacidad superior de almacenamiento de carbono en todos los compartimentos analizados respecto al sistema agroforestal, con valores de 7.62 t C/ha versus 5.06 t C/ha en hojarasca, 102.18 t C/ha versus 70.23 t C/ha en carbono orgánico del suelo, y 2.32 t C/ha versus 1.63 t C/ha en raíces. El carbono total almacenado fue significativamente mayor en el bosque intervenido (112.12 t C/ha) que en el sistema agroforestal (76.92 t C/ha), lo que equivale a 411.48 t CO<sub>2</sub>/ha y 282.32 t CO<sub>2</sub>/ha respectivamente. Estos hallazgos confirman el mayor potencial del bosque intervenido para la captura y retención de carbono atmosférico, destacando su importancia en estrategias de mitigación del cambio climático.

**Palabras clave:** Carbono orgánico del suelo, bosque intervenido, sistema agroforestal, almacenamiento de carbono.

## ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the carbon stored in the soil of a disturbed forest and an agroforestry system in the Puerto Alianza hamlet, Santa Rosa de Alto Yanajanca district, Peru. The study was conducted using a non-experimental comparative design to evaluate above- and below-ground biomass (litter, roots, and soil organic carbon). The methodology included the establishment of stratified sampling plots and specialized laboratory analysis to quantify organic carbon in each compartment evaluated. The results showed that the disturbed forest had a higher carbon storage capacity in all compartments analyzed compared to the agroforestry system, with values of 7.62 t C/ha versus 5.06 t C/ha in litter, 102.18 t C/ha versus 70.23 t C/ha in soil organic carbon, and 2.32 t C/ha versus 1.63 t C/ha in roots. Total carbon stored was significantly higher in the logged forest (112.12 t C/ha) than in the agroforestry system (76.92 t C/ha), equivalent to 411.48 t CO<sub>2</sub>/ha and 282.32 t CO<sub>2</sub>/ha, respectively. These findings confirm the logged forest's greater potential for capturing and retaining atmospheric carbon, highlighting its importance in climate change mitigation strategies.

**Keywords:** Soil organic carbon, logged forest, agroforestry system, carbon storage.

## I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye una de las problemáticas más apremiantes de nuestro tiempo, con impactos cada vez más evidentes en los ecosistemas terrestres y marinos, la diversidad biológica, y las sociedades humanas. Dentro de esta situación, el papel de los bosques y los sistemas agrícolas en el ciclo global del carbono ha cobrado una importancia sin precedentes. Los bosques primarios, con su rica biodiversidad y complejas estructuras, son considerados como sumideros de carbono cruciales, con la capacidad de retener grandes cantidades de este elemento en su biomasa y suelos. Sin embargo, la creciente presión sobre estos ecosistemas, derivada de la expansión agrícola y otras actividades antropogénicas ha resultado en una disminución considerable de la superficie boscosa en muchas partes de la amazonia.

En el Perú, particularmente en regiones como el distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca en la provincia de Marañón, la conversión de bosques primarios a tierras agrícolas ha sido una tendencia preocupante. Esta transformación no solo amenaza la biodiversidad local, sino que también tiene implicaciones significativas para el almacenamiento de carbono y, por ende, para la mitigación del cambio climático. En este escenario, los sistemas agroforestales han emergido como una alternativa prometedora, buscando conciliar las necesidades de producción agrícola con la conservación de servicios ecosistémicos, incluido el almacenamiento de carbono.

En este contexto, surge la necesidad imperativa de comprender y cuantificar las diferencias en el almacenamiento de carbono entre los bosques y los sistemas agroforestales. Este estudio no solo proporcionará datos empíricos sobre el almacenamiento de carbono en el suelo en estos ecosistemas, si no también contribuyendo al conocimiento sobre el ciclo del carbono en ecosistemas tropicales, además, los resultados permitirán identificar los sistemas de uso de tierra más eficientes en el almacenamiento de carbono, información crucial para la mitigación del cambio climático.

La presente investigación no solo buscará responder a la pregunta central sobre la variación del carbono almacenado entre diferentes ecosistemas, además generará datos científicos relevantes que podrán emplearse para orientar informar políticas locales de uso de la tierra y prácticas de manejo sostenible, contribuyendo así al conocimiento sobre la función de los sistemas agroforestales en la mitigación del cambio climático.

Definición del problema: ¿Cómo varía el carbono almacenado en el suelo entre un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el Caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Marañón?

Hipótesis: El carbono almacenado en el suelo varía significativamente entre un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el Caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Marañón.

### **Objetivo general**

Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Marañón.

### **Objetivos específicos**

- Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal
- Estimar el contenido de carbono total almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal
- Estimar el contenido de dióxido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) establece en el artículo 1 de su sección de definiciones que el cambio climático se entiende como "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables".

El cambio climático se refiere a las modificaciones estadísticamente relevantes en las condiciones del clima promedio o en su variabilidad dentro de una región específica, las cuales persisten durante extensos períodos temporales (tres décadas). Esta problemática se está transformando en una amenaza cada vez más evidente y tangible, dado que impacta de manera directa en la variabilidad del clima a nivel local, intensificando o reduciendo sus manifestaciones. Asimismo, ejerce efectos indirectos sobre la disponibilidad de recursos naturales y, lo que resulta más alarmante, agrava los problemas de pobreza (IPPC, 2007).

Las variaciones climáticas han sido un componente natural de la evolución terrestre, desarrollándose anteriormente de forma paulatina y brindando a las especies el tiempo necesario para desarrollar estrategias de adaptación que garantizaran su supervivencia. No obstante, durante los últimos 150 años, debido a múltiples actividades humanas, el planeta ha experimentado una serie de transformaciones significativas. Estas modificaciones resultan del incremento excesivo de gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluyendo el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Hidrofluorocarbonados (HFC), Perfluorocarbonados (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>). Dichos gases generan alteraciones en los patrones climáticos, provocando el calentamiento global y el incremento de la variabilidad climática, lo cual conlleva serias repercusiones económicas, sociales y ambientales que comprometen el equilibrio planetario (IPPC, 2007)

Las transformaciones climáticas de los últimos años han generado consecuencias significativas tanto en los ecosistemas naturales como en las sociedades humanas a nivel mundial, abarcando todos los continentes y océanos. Estas alteraciones del clima representan una amenaza para el logro exitoso de iniciativas dirigidas a combatir la pobreza, asegurar la seguridad alimentaria, salvaguardar la salud pública y mejorar la educación,

aspectos fundamentales para el progreso humano. La falta de atención a estos desafíos incrementa la fragilidad y exposición de las comunidades ante futuros riesgos (Zamora, 2015).

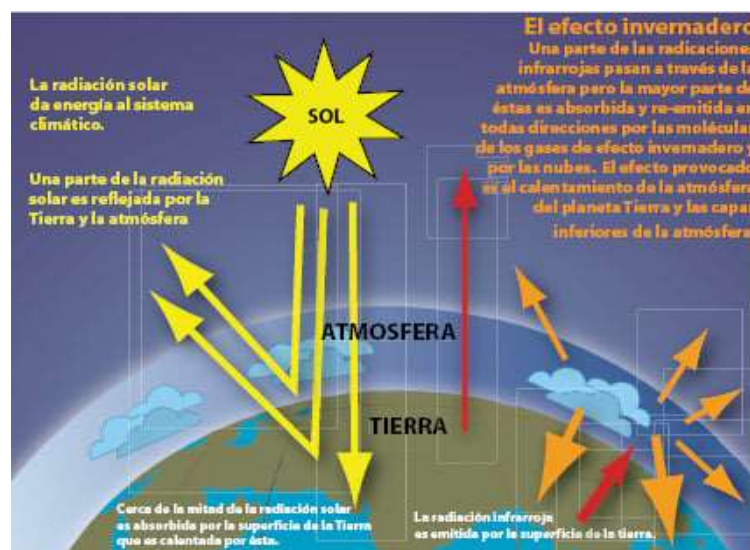
### 2.1.2. Calentamiento global

El calentamiento global constituye un fenómeno termodinámico que afecta a la biosfera del planeta, caracterizado por el incremento gradual de las temperaturas ambientales durante períodos que abarcan miles o millones de años. Este proceso representa la amplificación progresiva del efecto invernadero como resultado de la acumulación o entrada excesiva de energía solar en el sistema ambiental terrestre (Carrera, 2014).

El calentamiento global consiste en el incremento no natural de las temperaturas terrestres causado por la liberación de gases de efecto invernadero, los cuales se generan fundamentalmente mediante la combustión de recursos fósiles como carbón, petróleo y gas natural que empleamos en centrales energéticas, industrias, automóviles y otras actividades humanas (Valcárcel, 2017).

#### 2.1.2.1. Efecto invernadero

El fenómeno del efecto invernadero ocurre cuando la radiación infrarroja que emite nuestro planeta se comporta de manera diferente al atravesar la atmósfera: mientras que una porción logra escapar al espacio, otra fracción significativa es capturada y devuelta hacia la superficie por las moléculas de gases de efecto invernadero y las formaciones nubosas, generando así un aumento en la temperatura tanto de la superficie del planeta como de la capa atmosférica inferior conocida como troposfera (Costantini *et al.*, 2018).



Fuente: IPCC (2007)

Figura 1. Efecto invernadero

Ciertos gases presentes en la atmósfera terrestre (tales como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso) funcionan como una cubierta térmica que envuelve nuestro planeta, elevando su temperatura y obstaculizando la emisión de calor hacia el espacio exterior. Este fenómeno recibe el nombre de efecto invernadero, y estos compuestos que retienen el calor son conocidos como gases de efecto invernadero (IPPC, 2021).

### 2.1.2.2. Gases de efecto invernadero

Trespalacios *et al.* (2018) menciona que las acciones desarrolladas por el ser humano que involucran el uso de diversos materiales y recursos naturales han ocasionado un incremento en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI). Estos compuestos poseen la capacidad de capturar y redistribuir la radiación energética, enviándola de regreso hacia la superficie del planeta, lo que resulta en el calentamiento global conocido como Efecto Invernadero.

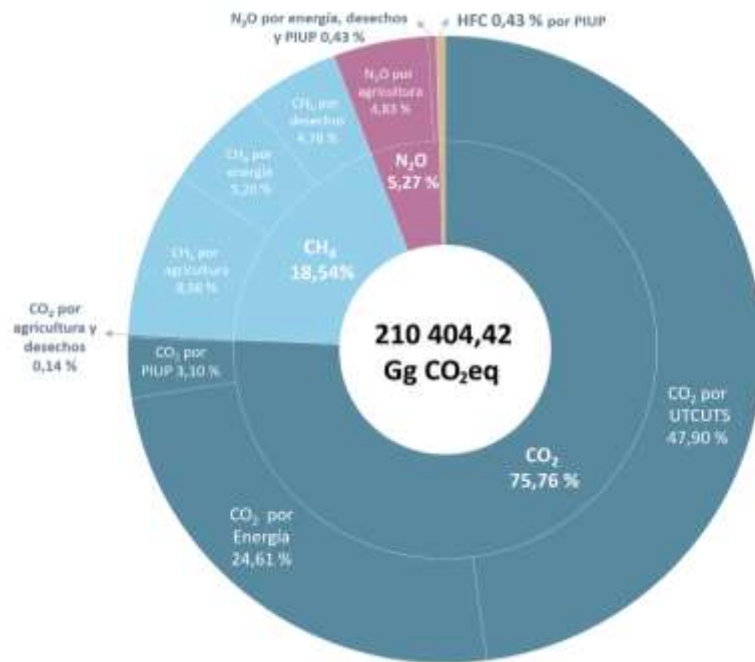
- **Dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>:** constituye aproximadamente el 70% del total de GEI presentes en la atmósfera. Su generación proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón, además de otros compuestos similares. Su emisión se evidencia en procesos industriales como la producción de cemento y en actividades del sector transporte
- **Metano - CH<sub>4</sub>:** representa alrededor del 20% del conjunto de GEI. Su origen se encuentra en diversas fuentes como la combustión de materia orgánica, la degradación de residuos biodegradables, las emisiones naturales provenientes de humedales y ciénagas, así como las actividades pecuarias y agrícolas.
- **Óxido nitroso - N<sub>2</sub>O:** contribuye con aproximadamente el 7% de los GEI totales. Su emisión se origina principalmente a través de actividades de manufactura industrial y la combustión de materia orgánica.
- **Hidrofluorocarbonados - HFCs:** constituyen el 1% de GEI. Se trata de compuestos empleados en equipos de refrigeración y calefacción, materiales de aislamiento térmico y propelentes para

aerosoles. Estos gases no existen de manera espontánea en la naturaleza, sino que han sido creados artificialmente por el ser humano para aplicaciones industriales específicas.

- **Perfluorcarburo - PFCs:** representa el 1% de los GEI. Estos compuestos se utilizan en equipos de aire acondicionado y refrigeración, sistemas contra incendios y procesos de limpieza de superficies metálicas. Al igual que otros gases industriales, no tienen origen natural y fueron creados sintéticamente por el ser humano para satisfacer necesidades comerciales e industriales.
- **Hexafluoruro de azufre - SF6:** contribuye con el 1% de los gases de efecto invernadero. Este compuesto se emplea como aislante en instalaciones eléctricas de alto voltaje, en la manufactura de aluminio y en la fabricación de determinados elementos electrónicos. Se trata de una sustancia completamente artificial que no existe en el medio ambiente natural, habiendo sido desarrollada exclusivamente por el ser humano para propósitos industriales.

En el año 2019, el país registró emisiones netas de 210,404.42 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente. Estas emisiones se distribuyeron entre los distintos gases de efecto invernadero de la siguiente manera: 159,395.34 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente proveniente de CO<sub>2</sub>, 39,014.02 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente procedente de CH<sub>4</sub>, 11,085.16 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente de N<sub>2</sub>O y 909.91 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente de HFC. Las emisiones de CO<sub>2</sub> provinieron del balance entre las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, que fueron de 161,371.32 Gg, y las remociones de CO<sub>2</sub>, que alcanzaron los -1,975.98 Gg (Ministerio del Ambiente, 2023).

Las principales fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub> son el uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y la silvicultura. En cuanto a las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, estas provienen principalmente de actividades agrícolas, incluyendo el sector ganadero. Por otro lado, las emisiones de HFC se deben completamente al uso de estos elementos en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, cuantificadas en el sector PIUP (Ministerio del Ambiente, 2023).



**Fuente:** Ministerio del Ambiente (2023)

**Figura 2.** Distribución de emisiones del país por GEI

### 2.1.3. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto es un tratado internacional adoptado en 1997 en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) responsables del calentamiento global. Entró en vigor en 2005 y estableció compromisos legalmente vinculantes para 37 países industrializados y la Unión Europea, quienes acordaron reducir sus emisiones en un promedio del 5 % respecto a los niveles de 1990 durante el primer período de compromiso (2008–2012).

El protocolo introdujo mecanismos innovadores como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el comercio de derechos de emisión y la aplicación conjunta, permitiendo a los países cumplir sus metas de forma flexible y promoviendo inversiones en tecnologías limpias.

En 2012, se aprobó la Enmienda de Doha, que extendió el protocolo hasta 2020 con nuevos compromisos de reducción del 18 % respecto a 1990, aunque su ratificación fue limitada. A pesar de sus avances, el protocolo fue criticado por excluir a países en desarrollo con altas emisiones y por la retirada de algunos firmantes clave, como Estados Unidos.

El Protocolo de Kioto sentó las bases para acuerdos posteriores, como el Acuerdo de París de 2015, y marcó un hito en la diplomacia ambiental al establecer por primera vez obligaciones concretas para mitigar el cambio climático.

#### **2.1.4. Composición de un bosque intervenido y un sistema agroforestal**

##### **2.1.4.1. Bosque intervenido**

Los bosques intervenidos constituyen una cobertura vegetal arbórea de naturaleza sucesional que surge en terrenos previamente devastados por intervenciones antropogénicas. El nivel de regeneración de estos ecosistemas estará determinado principalmente por el tiempo y la severidad del aprovechamiento previo para fines agrícolas o ganaderos, además de la cercanía a reservorios de semillas que permitan la recolonización del territorio modificado (OTCA, 2021).

Según el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC, 2018), el bosque secundario representa una etapa de cobertura forestal que se caracteriza por: (i) emerger tras una destrucción humana casi completa (superior al 90%) del bosque primario original, (ii) desarrollarse en una extensión suficientemente amplia donde las modificaciones del microclima y las nuevas condiciones de regeneración generan una estructura diferente a la del ecosistema forestal inicial, presentando una composición de especies arbóreas distinta y procesos dinámicos particulares, sin haber logrado recuperar todavía su condición primitiva, lo que lo distingue claramente del estado del bosque original.

##### **2.1.4.2. Sistema agroforestal**

Los sistemas agroforestales representan una modalidad de aprovechamiento del territorio donde árboles o arbustos establecen interacciones biológicas y ecológicas dentro de un espacio compartido con cultivos y/o ganado. Esta práctica de policultivo debe cumplir tres requisitos fundamentales: la presencia de un mínimo de dos especies que se relacionen entre sí, que al menos uno de los elementos sean especies arbóreas (plantas leñosas de ciclo perenne), y que como mínimo dos de estos componentes sean gestionados con propósitos productivos (MIDAGRI, 2021).

La Agroforestería constituye un sistema sostenible de gestión agrícola y territorial que busca incrementar la productividad de forma permanente, mediante la integración de especies forestales arbóreas (incluyendo árboles frutales y otras especies leñosas) con cultivos agrícolas y/o ganadería, ya sea de manera simultánea o en secuencia, dentro de la misma superficie de terreno. Este enfoque incorpora técnicas de manejo que se ajustan y son consistentes con las tradiciones culturales de las comunidades locales (Consejo Internacional

para la Investigación en la Agroforestería, 1982).

### **2.1.5. El carbono y el ciclo del carbono**

El carbono (C) constituye un elemento químico de distribución global, fundamental en la construcción de moléculas de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Todas las estructuras moleculares orgánicas se basan en cadenas carbonadas interconectadas. Representa el componente esencial de la existencia en nuestro planeta, siendo su ciclo vital para el crecimiento de todos los seres vivos. Se concentra en reservorios denominados depósitos y mantiene un flujo dinámico entre estos compartimientos. De estos almacenes naturales, los océanos contienen 38,000 Gt, los suelos 15,000 Gt, la atmósfera 750 Gt y la vegetación 560 Gt (FAO, 2002).

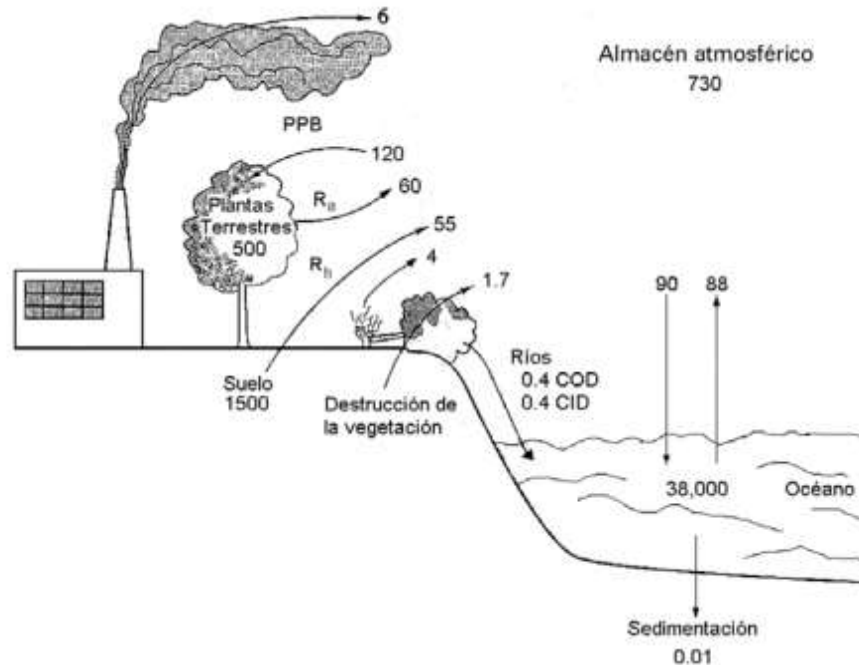
El término del ciclo del carbono abarca la circulación de este elemento y los mecanismos físicos, químicos y biológicos que regulan su movimiento entre los distintos reservorios del sistema terrestre. Estos depósitos se localizan en la atmósfera, hidrosfera, biosfera, rizosfera y litosfera, presentando capacidades de acumulación muy diversas (Martín, 2010).

Rojas *et al.* (2017) indica que el ciclo del carbono establece un equilibrio entre los flujos y los depósitos de este elemento. La dinámica del carbono se inicia en el reservorio atmosférico. Las plantas captan el CO<sub>2</sub> del aire a través del proceso fotosintético, aunque una porción de este CO<sub>2</sub> retorna nuevamente a la atmósfera. El movimiento del CO<sub>2</sub> en los ecosistemas terrestres está controlado principalmente por el suelo (Rosenzweig y Hillel, 2000), dado que en este medio se descomponen continuamente restos vegetales, animales y materia orgánica. Este proceso presenta un carácter dinámico y ejerce una influencia decisiva sobre las condiciones climáticas globales.

El depósito de carbono en los ecosistemas terrestres se concentra fundamentalmente en la biomasa leñosa de los árboles y en la materia orgánica presente en los suelos, constituyendo en conjunto una reserva de carbono que equivale aproximadamente al triple de la reserva de carbono contenida en el CO<sub>2</sub> atmosférico (Saugier y Pontailier, 2006).

Las acciones antropogénicas ejercen un impacto considerable sobre el ciclo del carbono. La combustión de combustibles fósiles, las transformaciones en el uso del territorio y la utilización de caliza en la producción de cemento liberan volúmenes sustanciales de carbono hacia la atmósfera. En consecuencia, la concentración de dióxido de carbono atmosférico se está incrementando aceleradamente, alcanzando niveles superiores a cualquier

período registrado en los últimos 3,6 millones de años. Los océanos absorben una gran proporción del dióxido de carbono que se emite durante la quema de combustibles fósiles (NOAA, 2025).



**Fuente:** Jaramillo (2004)

**Figura 3.** Ciclo del carbono

### 2.1.6. Suelos amazónicos

Según Peña (2020), los suelos constituyen la base fundamental de los ecosistemas forestales y representan el principal medio para la producción alimentaria. En la región amazónica, estos suelos se caracterizan por ser altamente desarrollados evolutivamente, lo cual paradójicamente los convierte en terrenos de escasa fertilidad natural, con capacidades limitadas para nutrir la vegetación y mantener actividades agrícolas o ganaderas de manera sostenida en el tiempo. La riqueza nutritiva de estos suelos amazónicos no proviene de sus componentes minerales, sino que está fundamentada en los procesos de descomposición y transformación de materia orgánica que llevan a cabo los diversos microorganismos y fauna edáfica presentes en el ecosistema. Cuando se produce la deforestación de los bosques amazónicos o se modifica el uso tradicional del territorio, se inicia un proceso de deterioro del suelo que conlleva la pérdida progresiva de la abundante biodiversidad de organismos terrestres, los cuales funcionan como el motor biológico esencial para mantener la salud y continuidad del ecosistema edáfico.

## 2.1.7. Carbono y materia orgánica en el suelo

### 2.1.5.1. Carbono orgánico del suelo

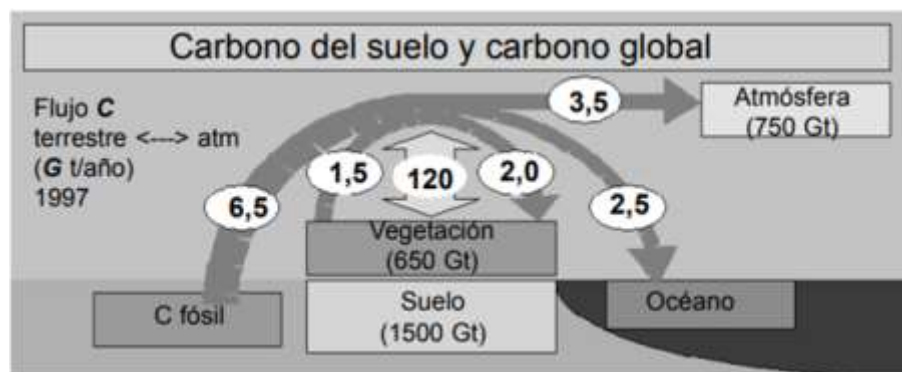
El COS constituye una fracción reducida dentro del complejo ciclo global del carbono, que abarca interacciones entre el terreno, la flora, los océanos y el aire que nos rodea. Los cálculos indican que el almacén de COS retiene alrededor de 1 500 PgC en el primer metro de profundidad del suelo, una cantidad mayor que el carbono encontrado en la atmósfera (unos 800 PgC) y y en las plantas terrestres (500 PgC) combinados (FAO, 2017). Esta considerable reserva de COS no es estático; más bien, se mueve continuamente entre varios depósitos de carbono globales en diversas estructuras moleculares (Kane, 2015).

El carbono orgánico presente en el suelo adopta diversas formas, incluyendo residuos orgánicos apenas poco alterados de plantas, fauna y microorganismos, hasta sustancias húmicas y compuestos altamente condensados con una composición cercana al carbono elemental. En entornos naturales, el equilibrio del carbono orgánico edáfico se determina por la introducción de materia orgánica nueva al suelo y la liberación de carbono como CO<sub>2</sub> a la atmósfera, ya sea por procesos como la erosión, la lixiviación o la actividad microbiana (Aguilera, 2000).

En situaciones aeróbicas de los suelos, una porción del carbono que entra al suelo (aproximadamente 55 Pg C al año globalmente) tiene una naturaleza inestable y se descompone velozmente, mientras que una fracción menor se convierte en humus estable (alrededor de 0,4 Pg C año<sup>-1</sup>) (FAO, 2001). La emisión de CO<sub>2</sub> del suelo hacia la atmósfera no solo proviene de la descomposición de la materia orgánica del suelo, en la cual participan organismos descomponedores y microorganismos, sino también de la actividad de las raíces de las plantas (Martínez *et al.*, 2008).

En esencia, la cantidad de COS almacenada en un suelo específico está determinada por el equilibrio entre la entrada de carbono al suelo y su liberación en forma de gases respiratorios establecidos en carbono, resultantes de procesos como la descomposición microbiana y, en menor medida, el lavado del suelo en forma de carbono orgánico disuelto (COD). A nivel local, asimismo consigue haber pérdida o ganancia de carbono a través del movimiento o acumulación de sedimentos, lo que conduce en una nueva distribución del carbono edáfico a nivel de sitio, paisaje y región. Por ende, , la regulación de los depósitos de COS se regulan especialmente mediante la gestión el volumen y la clase de desechos orgánicos que ingresan al suelo (es decir, la aportación de carbono orgánico al ecosistema edáfico y reduciendo al mínimo las pérdidas de carbono del suelo (FAO, 2017).

Los elementos que dirigen la degradación del material orgánico del suelo abarcan la temperatura y el contenido hídrico del suelo (principalmente determinadas por las condiciones climáticas), elementos que ejercen una influencia significativa en el almacenamiento de carbono edáfico debido a su efecto en la actividad de los microorganismos. Además, la estructura de la población microbiana, como la proporción entre bacterias y fungi, igualmente logra afectar la descomposición selectiva de ciertos compuestos. Se señala que la supuesta recalcificación química de las moléculas complejas que retienen carbono orgánico del suelo, tales como la lignina o los lípidos, no favorece de manera sustancial a la durabilidad de la MOS en el suelo, según (Thévenot *et al.*, 2010).



**Fuente:** FAO (2002)

**Figura 4.** Carbono del suelo y el carbono global

La mayor cantidad de carbono orgánico edáfico encuentra típicamente en los ecosistemas de los bosques tropicales. Los suelos de estos bosques albergan grandes cantidades de materia orgánica, como hojas caídas, ramas y otros restos vegetales. La descomposición pausada de esta materia orgánica en ambientes cálidas y húmedas contribuye a la acumulación de carbono en el suelo (NASA, 2021).

Algunos estudios han encontrado que los bosques tropicales tienen una mayor concentración de CO<sub>2</sub> que los bosques templados, debido a la mayor productividad primaria, la mayor temperatura y la mayor humedad. Sin embargo, otros estudios han señalado que los bosques templados pueden tener una mayor concentración de CO<sub>2</sub> que los bosques tropicales, debido a la menor descomposición de la materia orgánica, la mayor profundidad del suelo y la mayor proporción de carbono orgánico recalcitrante (Zamora *et al.*, 2018).

**Tabla 1.** Distribución de C Orgánico del Suelo (por Ecosistemas)

Ecosistemas	Producción anual neta (Mg C ha-1 a-1)	Media de hojarasca (Mg C ha-1 a-1)	Media de COS (Mg C ha-1 a-1)	Área terrestre (Millones ha)	Total terrestre de COS (Pg C)
Bosque tropical	9	1,5	104	2450	255
Bosque templado	5,5	12,1	118	1200	142
Bosque boreal	3,6	20	149	1200	179
Matorral, chaparral	2,7	28	69	850	59
Sabana tropical	3,2	1	37	1500	46
Pradera templada	2,3	2	192	900	173
Tundra y pradera alpina	0,6	5	216	800	173
Subdesiertos y semiáridos	0,3	0,11	56	1800	101
Desiertos y glaciales	0,02	0,01	1	2400	3
Agrosistemas	2,9	0,5	127	1400	178
Pantanos y manglares	11,2	12,5	686	200	137
SUBTOTALES	-	-	-	14700	1456

**Fuente:** Gallardo (2004)

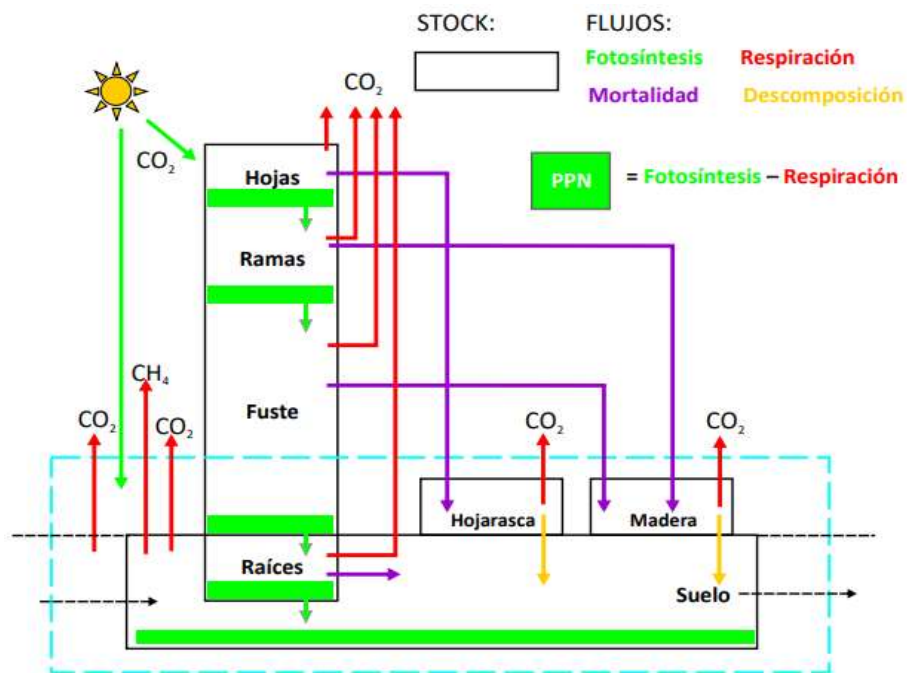
### 2.1.5.2. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo constituye un indicador fundamental de su calidad, tanto desde la perspectiva agrícola (incluyendo la productividad y los aspectos económicos) como desde el punto de vista ambiental (abarcando el secuestro de carbono y la calidad atmosférica). Representa el elemento principal que define la actividad biológica edáfica. La abundancia, diversidad y actividad de la fauna del suelo y los microorganismos mantienen una relación directa con la materia orgánica. Esta materia y la actividad biológica que promueve ejercen una influencia considerable sobre las características químicas y físicas del suelo. El contenido de materia orgánica favorece la agregación y estabilidad estructural del suelo, incrementando consecuentemente la velocidad de infiltración, la capacidad de retención hídrica y la resistencia frente a la erosión hídrica y eólica. Asimismo, la materia orgánica optimiza la dinámica y disponibilidad de los nutrientes fundamentales para el desarrollo vegetal (Robert, 2006).

### 2.1.8. Fijación de carbono

El secuestro de carbono en el suelo conlleva la extracción del carbono atmosférico mediante el proceso fotosintético de las plantas y su posterior almacenamiento en

el suelo bajo la forma de materia orgánica estable y permanente (Etchevarría & Barahona, 2017). En el caso particular del  $\text{CO}_2$ , el mecanismo de retención abarca tres etapas: 1) la absorción del  $\text{CO}_2$  atmosférico a través de la fotosíntesis; 2) la conversión del carbono del  $\text{CO}_2$  en biomasa vegetal; y 3) la migración del carbono desde la biomasa vegetal hacia el suelo, donde se deposita como compuestos orgánicos solubles en carbono (COS) en el depósito más vulnerable a modificaciones (Kane, 2015). Este depósito se distingue por presentar una velocidad de renovación más elevada, producto del equilibrio dinámico entre los restos vegetales que ingresan al suelo y su pérdida por descomposición o mineralización provocada por microorganismos (Burbano, 2016).



**Fuente:** Honorio & Baker (2010)

**Figura 5.** Fijación de carbono

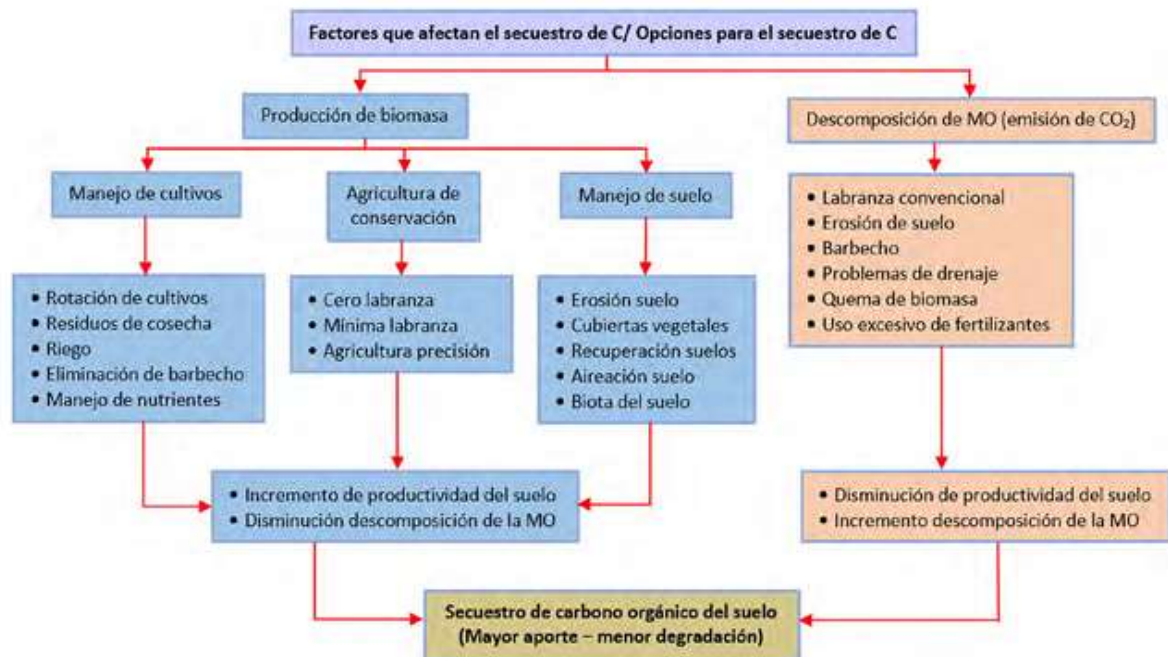
El suelo cuenta con una capacidad considerable para retener carbono, aunque esta capacidad se encuentra limitada y está influenciada por varios elementos, como la composición y contenido de arcillas, así como la densidad y profundidad del suelo. Además, las condiciones climáticas, incluyendo la precipitación, temperatura y radiación solar, desempeñan un papel crucial en este proceso (Etchevarría & Barahona, 2017). Desde una perspectiva química, el carbono puede adherirse de manera robusta a las arcillas mediante enlaces químicos que previenen su consumo por parte de organismos. Desde una perspectiva bioquímica, el carbono puede ser sintetizado de nuevo en moléculas complejas que dificultan su descomposición. Estos mecanismos están condicionados por una variedad de factores

biológicos, no biológicos y de manejo, que determinan la efectividad de la estabilización del carbono en el suelo (Kane, 2015).

En líneas generales, la actividad del ciclo del carbono y la retención de carbono son más pronunciadas en la superficie del suelo, mientras que el carbono estabilizado, con períodos de retención más prolongados, representa una proporción significativa del carbono orgánico total presente en las capas más profundas del suelo (Rumpel *et al.*, 2012). Beare *et al.* (2014) calcularon que, a mayores profundidades, los suelos poseen una capacidad superior para almacenar carbono adicional en comparación con las capas superficiales, debido a una mayor discrepancia entre el contenido actual de carbono orgánico soluble (COS) y su nivel de saturación. La acumulación de carbono estables con largos períodos de retención en las capas profundas del suelo puede atribuirse al transporte continuo, la inmovilización temporal y el procesamiento microbiano del carbono orgánico disuelto (COD) en el perfil del suelo, así como a la eficiente estabilización de la materia orgánica derivada de las raíces en la matriz del suelo (Rasse *et al.*, 2005). Lorenz y Lal (2005) destacaron que los subsuelos podrían almacenar entre 760 y 1520 Pg de carbono adicional.

#### **2.1.9. Factores que influyen en el secuestro de carbono en el suelo**

A pesar de los múltiples beneficios que aporta la materia orgánica (MO) a los suelos, aumentar sus niveles constituye un proceso complejo y desafiante. Este incremento demanda una inversión considerable de tiempo, la implementación de técnicas agrícolas adecuadas y el mantenimiento sostenido de estas estrategias durante períodos medios y prolongados.



**Fuente:** Chowdhury (2011)

**Figura 6.** Factores que afectan el secuestro de carbono en el suelo

La retención del carbono en el suelo está determinada principalmente por el equilibrio entre las contribuciones orgánicas y las pérdidas generadas por procesos de descomposición. No obstante, existen diversos elementos que cumplen una función esencial en los mecanismos de estabilización del carbono, tales como las características mineralógicas del suelo, las condiciones climáticas prevalentes, las prácticas de laboreo empleadas, las modificaciones en el destino y uso del territorio, así como el ritmo al cual se incorpora nueva materia orgánica al sistema edáfico.

## 2.2. Estado del arte

### 2.2.1. Antecedentes

#### 2.2.1.1. Internacional

Manchabajoy *et al.* (2022) realizaron su investigación en el departamento de Nariño en Colombia, con el objetivo de evaluar el carbono almacenado en la biomasa aérea y bajo el suelo en cuatro sistemas productivos de café castillo, café a libre exposición (T1), café-limón (T2), café-guamo (T3) y café-carbonero de seis años de edad. Hallaron diferencias altamente significativas en los cuatro tratamientos evaluados, siendo T4 el que mayor concentración de carbono obtuvo tanto en la biomasa del suelo con  $100,14 \text{ t C ha}^{-1}$ .

Hernández *et al.* (2021) llevaron su investigación en el departamento del Meta, Colombia, con el propósito de cuantificar el almacenamiento de carbono en diversos compartimentos: superficie, biomasa, necromasa y carbono orgánico del

suelo. La investigación abarcó diferentes sistemas de uso de suelo, incluyendo sistemas agroforestales (SAF) con cacao, SAF con café, sistemas silvopastoriles (SPS) y bosque natural. Los resultados del estudio revelaron que el bosque natural presentó las mayores concentraciones de carbono, tanto en el suelo como en la necromasa, con valores de 40,8 tC/ha y 19,3 tC/ha, respectivamente. (Hernández, y otros, 2021)

Sánchez (2016) realizó su investigación en las micro cuencas Tecomapa, Somotillo y Río Pire, Condega, Nicaragua, con el objetivo de evaluar el carbono atmosférico removido por plantas y almacenado en el suelo, en diferentes sistemas de usos de la tierra: agrícola, agrosilvícola, agro forestal, forestal, y pecuario. En ambas micro cuencas, la mayor captura de carbono en el suelo ocurrió en el sistema bosque secundario (10,51 t C ha<sup>-1</sup>), seguido de las pasturas silvopastoriles (9,97 t C ha<sup>-1</sup>) y los sistemas agroforestales Quesungual (7,77 t C ha<sup>-1</sup>).

#### **2.2.1.2.Nacional**

Guevara (2022) llevo a cabo su estudio en la ciudad de jaen, ubicado en la región de Cajamarca, con la finalidad de Estimar la reserva de carbono almacenado en el Área de Conservación Municipal Bosque de Huamantanga. Como resultado obtuvo: 415.2950 t/ha de biomasa vegetal total, 186,6018 tC/ha acumulado en árboles, arbustos, hierbas, hojarasca y necromasa; 153,58575 tC/ha en el suelo

Enriquez (2018) realizó su investigación en el Valle de Esquilaya, ubicado en el distrito de Ayapata, provincia de Carabaya, región Puno, con el objetivo de determinar la captura de carbono en suelos de un sistema agroforestal con café (*Coffea arábica*) y en pastura. El investigador encontro diferencia significativa entre sistemas con café a diferencia de la pastura ya que el carbono orgánico para sistema con caé fue de 108,6 t C ha<sup>-1</sup>, y para pastura 38,3 t C ha<sup>-1</sup>.

Cuellar *et al.* (2015) realizó su investigación en la Cuenca de Aguaytía, con el objetivo de determinar el patrón de cambios en el carbono almacenado que se produce por el cambio de uso del bosque tropical. Los sistemas de uso de suelo fueron: Bosque primario remanente, purma alta, purma baja, palma aceitera, pastizal y cultivo. Con respecto al depósito suelo, encontraron diferencias significativas mínimas entre todos los depósitos, bosque primario 71,5 t C/ha, purma alta 71,1 t C/ha, palma aceitera 71,9 t C/ha y, purma baja 69,8 t C/ha, Pasturas 71,1 t C/ha, y Cultivo 71,4 t C/ha.

### 2.2.1.3.Local

Perez (2023) realizó su investigación en la zona de Río Azul, Hermilio Valdizán, en un sistema agroforestal de café de la variedad Caturra de 12 años, para esto se planteó como objetivo evaluar el carbono almacenado en la biomasa vegetal y el suelo de la zona. Los resultados obtenidos muestran que la cantidad de carbono en la biomasa vegetal detalla un valor de 47,98 t C ha<sup>-1</sup> para las especies forestales, las herbáceas y arbustos registran 0,81 t C ha<sup>-1</sup>, para el caso de la hojarasca se tiene 5,66 t C ha<sup>-1</sup> y en las raíces en promedio se concentran 0,92 t C ha<sup>-1</sup> en promedio. Para el caso del suelo se estima una concentración de 100,61 t C ha<sup>-1</sup>.

Zavala & Vega (2021) realizó su estudio en la ciudad de Tingo María, con la finalidad de evaluar la influencia de la edad del cultivo del cacao (*Theobroma cacao L.*) bajo sistemas agroforestal en la captura y almacenamiento del carbono en la biomasa del cacao, en el suelo y especies forestales. En cuanto al carbono en el suelo, no encontraron diferencias significativas entre los sistemas evaluados, sin embargo, el sistema agroforestal con cacao menores de 8 años presentó la mayor reserva de carbono en el suelo con 66,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal de 8 a 16 años con 62,38 t C/ha mientras que el sistema agroforestal mayor de 16 años presenta la menor reserva con 59,08 t C/ha.

Cóndor (2019) llevó a cabo un estudio en el bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), ubicado en Tingo María, Perú. El objetivo principal de esta investigación fue cuantificar las reservas de carbono orgánico en el suelo a través de diversas unidades fisiográficas presentes en este ecosistema forestal. Los resultados del estudio revelaron variaciones significativas en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo entre las diferentes unidades fisiográficas: Zona montañosa demostró la mayor capacidad de almacenamiento, con 101,26 t C/ha, colina alta clase 2 registró 95,64 t C/ha, colina alta clase 1 almacenó 91,04 t C/ha, colina baja clase 2 mostró una capacidad de 90,88 t C/ha y colina baja clase 1 presentó el menor almacenamiento, con 85,75 t C/ha.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS



#### 3.1. Lugar de ejecución

Esta investigación se llevó a cabo en un bosque intervenido y en un sistema agroforestal, situado en el Caserío de Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, Provincia de Marañón, departamento de Huánuco.



**Figura 7.** Ubicación del proyecto

**Tabla 2.** Descripción de las áreas de estudio

Ecosistema	Símbolo	Coordenadas UTM		Descripción	Área (ha)
		Este	Norte		
Bosque intervenido		344731	9032954	Esta constituido con diversas especies forestales como el Tornillo, Moena, Cedro y entre otros.	5
Sistema agroforestal		345078	9033445	Presenta cultivos de café ( <i>Coffea arabica</i> ) asociados a especies forestales como Tornillo y Guaba.	5

**Tabla 3.** Propiedades del suelo del área de estudio.

<b>Propiedades del suelo</b>	<b>Bosque intervenido</b>	<b>Sistema agroforestal</b>
Textura	Franco arenoso	Franco arenoso
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,24	0,18
pH	4,22	4,14
Materia orgánica (%)	2,73	1,92
Nitrógeno (%)	0,056	0,046
Fosforo (ppm)	12,78	8,32
Potasio (ppm)	33,62	20,42
CICe	4,63	3,6

### **3.1.1. Procesamiento de las muestras**

Los análisis de las muestras se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, cuya posición geográfica es 390649 m Este y 8970300 m Norte, a una elevación de 668 metros sobre el nivel del mar.

### **3.1.2. Condiciones climáticas**

El clima en el distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, los veranos son cortos, muy caliente y parcialmente nublados y los inviernos son largos, caliente, y mayormente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 20 °C a 32 °C y rara vez baja a menos de 19 °C o sube a más de 35 °C. Lluvia durante el año la mayoría de la lluvia cae en los meses de enero, febrero y marzo, los meses aproximados con menor cantidad de lluvias son agosto y septiembre (Municipalidad Distrital de Santa Rosa de Alto Yanajanca, 2020).

### **3.1.3. Morfología**

De acuerdo a la Municipalidad Distrital de Santa Rosa de Alto Yanajanca (2020), los rasgos morfológicos más importantes y característicos de los centros poblados rurales, caseríos y anexos que forman parte del distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca presentan una variedad de paisajes naturales y culturales enmarcados en altitudes diferenciados por relieves complejos que reflejan la variedad de climas, vegetación, fauna y otros. El relieve de la zona al terminar los ríos y riachuelos forman gargantas y pinzas, podemos establecer que los principales elementos del relieve son: Estrechas fajas onduladas e innumerables que constituyen las quebradas, planos inclinados, cuyos suelos son aprovechados en sectores naturales, está rodeado de una serie variedades de flora y fauna.

### **3.1.4. Zonas de vida**

Ecológicamente de acuerdo a la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo y el diagrama bioclimático de Holdridge (1982), el distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca se encuentra en la formación vegetal bosque muy húmedo Pre-montano Tropical bmh-PT, y de acuerdo a las regiones naturales del Perú corresponde a Rupa Rupa o Selva Alta.

## **3.2. Materiales y métodos**

### **3.2.1. Materiales**

Rafia, bolsas de papel, bolsas plásticas, cuadrante de madera de 0.5m. x 0.5 m, papel kraft, cinta métrica, costales de polietileno de 50 kg, libreta de campo, machetes, estacas, plumón indeleble, lapiceros, pala recta, wincha de 50 m, cilindro muestreador y comba.

### **3.2.2. Equipos**

Se utilizaron GPS, cámara fotografica, balanza digital y estufa. Además, se emplearon herramientas de software como Microsoft Excel y Word (2016), Arcgis 10.3, Google Earth y IBM Spss Statistics 25.

### **3.2.3. Metodología**

#### **3.2.3.1. Nivel de investigación**

Este estudio se clasifico de carácter comparativo, porque va a comparar si las medias presentan significancia.

#### **3.2.3.2. Tipo de investigación**

Esta investigación es de tipo descriptivo, ya que se enfocó en describir el efecto de las variables en estudio.

#### **3.2.3.3. Variables y operacionalización**

##### **a. Variable independiente**

- Tipo de ecosistema

##### **b. Variable dependiente**

- Carbono almacenado en el suelo
- Carbono total almacenado
- Dióxido de carbono almacenado

**Tabla 4.** Operacionalización de variables

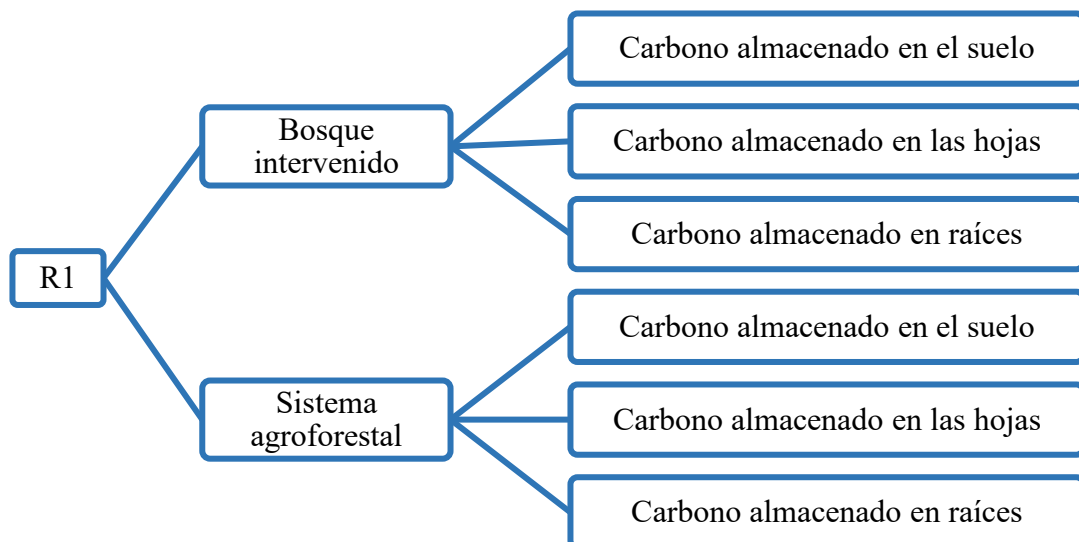
Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
<b>Variable independiente:</b> Tipo de ecosistema	Vegetación	Bosque intervenido	ha
		Sistema agroforestal	ha
<b>Variable dependiente:</b> Carbono almacenado	Suelo	Carbono en el suelo	t C/ha
	Raíces	Carbono en las raíces	t C/ha
	Hojarasca	Carbono en las hojarascas	t C/ha

#### 3.2.3.4. Matriz de consistencia

Se puede observar en la tabla 5.

#### 3.2.3.5. Diseño de investigación

Esta investigación se clasifica como descriptiva y no experimental, ya que se enfocó en analizar las variables sin intervenir en los factores de variación. En el proceso de análisis, se emplearán criterios técnicos y científicos que puedan ser demostrados.



[R] Repeticiones 1,2

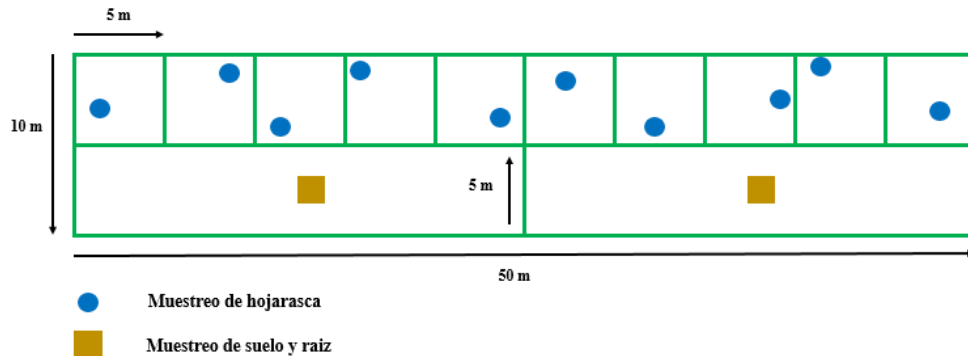
**Figura 8.** Diseño de la investigación

**Tabla 5.** Matriz de consistencia de la investigación

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLE</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<p><b>General</b></p> <p>¿Cómo varía el carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el Caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Maraón?</p>	<p><b>General</b></p> <p>Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Maraón</p>	<p><b>General</b></p> <p>El carbono almacenado en el suelo varía significativamente de un bosque intervenido y un sistema agroforestal en el Caserío Puerto Alianza, distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Maraón.</p>	<p><b>Independiente</b></p> <p>Tipo de ecosistema</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b> Descriptivo</p> <p><b>Nivel de investigación:</b> Comparativa</p> <p><b>Diseño:</b> No experimental</p> <p><b>Técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestreo de suelo y hojarasca</li> <li>• Análisis de laboratorio</li> </ul> <p><b>Instrumentos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fichas de registro</li> <li>• Equipos de laboratorio</li> </ul> <p><b>Población:</b> Suelos del caserío de Puerto Alianza</p> <p><b>Muestra:</b> Parcelas de 20x50 m</p> <p><b>Análisis de datos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estadística descriptiva</li> <li>• Coeficiente de variación</li> <li>• Normalidad</li> <li>• Prueba de Levene</li> <li>• T de Student</li> </ul>
<p><b>Específicos</b></p> <p>¿Cuál es el contenido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal?</p>	<p><b>Específicos</b></p> <p>Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal</p>	<p><b>Específicos</b></p> <p>El contenido de carbono almacenado del suelo es mayor en el bosque intervenido que en el sistema agroforestal</p>	<p><b>Dependiente</b></p> <p>Carbono en las hojarasca</p>	
<p>¿Cuál es el contenido de carbono total almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal?</p>	<p>Estimar el contenido de carbono total almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal</p>	<p>El contenido de carbono total almacenado en el suelo es mayor en el bosque intervenido que en el sistema agroforestal</p>	<p>Carbono orgánico en el suelo</p>	
<p>¿Cuál es el contenido del dióxido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal?</p>	<p>Estimar el dióxido de carbono almacenado en el suelo de un bosque intervenido y un sistema agroforestal</p>	<p>El contenido del dióxido de carbono almacenado en el suelo es mayor en el bosque intervenido que en el sistema agroforestal</p>	<p>Carbono en las raíces</p>	

### 3.2.3.6. Diseño de muestreo

Se definieron las áreas de muestreo mediante la aplicación de una metodología de muestreo estratificado aleatorio (Schlegel *et al.*, 2001). En este proceso, se emplearon parcelas de 500 m<sup>2</sup> (50 x 10 m), distribuidas de manera aleatoria en cada ecosistema establecido. En el interior de la parcela, se implementó una subparcela de 5 x 5 m (MacDicken, 1997) para la toma de muestras de hojarasca, dividida en 10 partes iguales.



**Figura 9.** Detalle de parcela en estudio

Con el fin de tomar muestras de carbono orgánico y sistemas radiculares, se hicieron excavaciones del suelo con dimensiones 0.3m x 0.3m x 0.3m, colocadas al azar dentro de las subparcelas de 5 x 25 m, donde además se realizarán análisis texturales. Se seguirá la recomendación de extraer muestras hasta los 30 centímetros de profundidad, segmentando en tres intervalos: de 0 a 10 cm, de 10 a 20 cm, y de 20 a 30 cm (ICRAF, 2009).

### 3.2.3.7. Población y muestra

#### a. Población

Este estudio considero como población los suelos presentes en los dos tipos de ecosistemas del caserío Puerto Alianza.

#### b. Muestra

En esta investigación se consideraron cuatro áreas específicas: dos áreas en el bosque intervenido y dos áreas en sistemas agroforestales.

### 3.2.3.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### a. Fuentes

Se emplearon tanto fuentes primarias como secundarias, incluyendo referencias de la bibliografía nacional e internacional.

## **b. Instrumentos**

Se emplearon fichas de medición como instrumento, destinada a registrar los datos de pesos frescos y secos de la hojarasca y raíces, densidad aparente y contenido de materia orgánica de los suelos. Esta ficha, diseñada para recopilar información en cada etapa del proceso, que consto de tres (03) fases: campo, laboratorio y la fase final de gabinete.

### **3.2.3.9. Análisis de datos**

Se procedió a organizar y categorizar los datos conforme a las variables establecidas para su análisis. El procesamiento y la interpretación estadística se realizó utilizando el software SPSS en su versión 24.

Los datos, provenientes del bosque y del sistema agroforestal, se vieron afectados por diversas formas de vegetación y tipos de suelos, lo que resulta en su dispersión. Se aplicaron pruebas estadísticas, como:

- Estadística descriptiva
- Pruebas de normalidad
- Cálculo de coeficiente de variación
- Prueba de Levenne
- T de Student

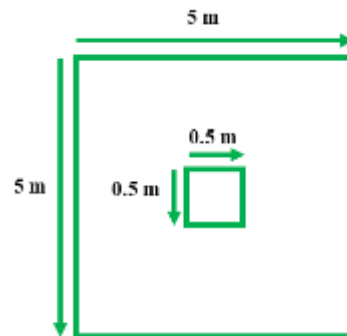
### **3.2.3.10. Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo**

#### **a. Hojarasca**

Se recolectaron restos vegetales como hojas, flores, frutos, semillas y sus fragmentos, además de ramas pequeñas con un diámetro menor a 4 cm. La hojarasca se recopiló completamente en un área de 0.25 m<sup>2</sup> (0.50 x 0.50 m), dispuesta aleatoriamente dentro de las subparcelas temporales de 5 x 5 m, donde se registrarán el peso fresco total por cada subparcela (aproximadamente de 200 g) según lo indicado por ICRAF (2009). Posteriormente, el material se almaceno en una bolsa de plástico debidamente identificada para su transporte y análisis en laboratorio.

La hojarasca fresca recopilada se envolvió en papel kraft y se determinó su peso húmedo en una balanza analítica. Posteriormente, la muestra se llevó a la estufa a 70 °C durante aproximadamente 48 horas, hasta alcanzar un peso estable. Al finalizar

el secado, se volvió a pesar para determinar la biomasa por diferencia de masas, conforme a las directrices del ICRAF (2009).



**Figura 10.** Detalle de cuadrantes interiores de 0,5 m x 0,5 m para la medición del carbono en la biomasa seca

La estimación del carbono acumulado en la capa de hojarasca se realizó mediante el método sugerido por el Centro Mundial de Agroforestería (2009).

$$CH = \left( \left( \frac{MF_{\text{sub-mues}}}{MS_{\text{sub-mues}}} \right) * MF_{\text{mues}} \right) * 0.5 \dots (1)$$

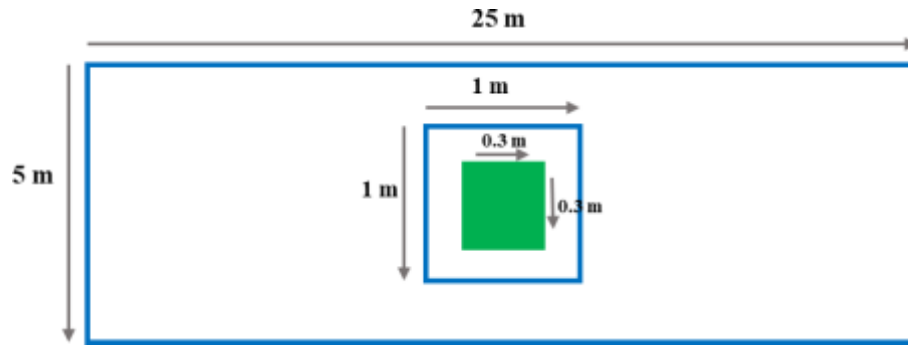
Dónde:

- CH : Carbono en hojarasca (t C ha<sup>-1</sup>)
- MF<sub>sub-mues</sub> : Materia fresca (kg) de la sub-muestra
- MS<sub>sub-mues</sub> : Materia seca (kg) de la sub-muestra
- MF<sub>smues</sub> : Materia fresca de la muestra (kg/0,25 m<sup>2</sup>)
- 0.50 : Valor propuesto por IPCC.

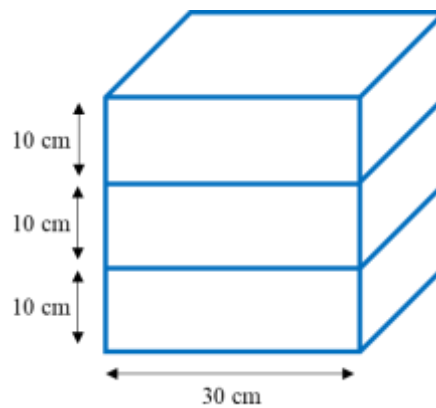
### b. Suelo

Dentro de los espacios delimitados de 5 x 25 m, se seleccionaron de manera aleatoria una subparcela de 1 m<sup>2</sup> con el propósito de llevar a cabo la extracción del suelo con dimensiones de 0.30 m x 0.30 m x 0.30 m. Luego, se establecieron las profundidades de muestreo en los siguientes intervalos: desde la superficie hasta 10 cm, de 10 a 20 cm, y de 20 a 30 cm de profundidad (ICRAF, 2009).

Los especímenes recolectados debidamente etiquetadas serán transportadas al laboratorio para para determinar la cantidad de COS.



**Figura 11.** Detalle de cuadrantes interiores de 0,3 m x 0,3 m para la medición del carbono en el suelo



**Figura 12.** Diagrama de la toma de muestra para el suelo.

Para medir el carbono acumulado en el suelo, se utilizó la técnica de Walkley y Black. El contenido de materia orgánica (% MO) se determinó mediante análisis de laboratorio.

Para determinar el nivel de carbono en el suelo se tomó en consideración el nivel de materia orgánica por cada muestra, para esto se empleó la fórmula alométrica propuesto por Zavala *et al.* (2018).

$$\text{COS} = \frac{\text{MO} \cdot 100}{1.724} \dots (2)$$

Donde:

COS : Carbono en el suelo ( $\text{t C ha}^{-1}$ )

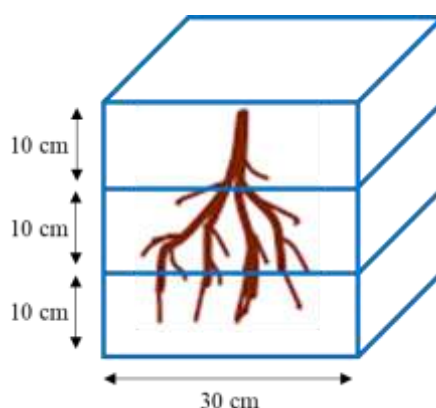
MO : % de materia orgánica

1.724 : Constante de Van Vannmelen

### c. Raíces

Se aplicó el método recomendada por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF, 2009) para realizar el muestreo de carbono almacenado en raíces. Se hicieron excavaciones de 0.30 m en cada dimensión, se tomarán muestras con la asistencia de un barreno, a diferentes profundidades: 0 - 0.1 m; 0.1 - 0.2 m y 0.2 - 0.3 m. Estas muestras se colocaron en bolsas plásticas con el fin de llevarlas al laboratorio para su subsiguiente análisis.

Las raíces fueron seleccionadas mediante un proceso de lavado y tamizado. Se llevaron a cabo mediciones del peso en estado húmedo, seguido de un secado en una estufa a 70 °C durante un periodo de 48 horas, hasta lograr un peso estable. Una vez alcanzado este peso estable, se volvió a realizar la medición para hallar el material seco y calcular la biomasa mediante la diferencia de pesos. Con estos datos, se estimará la cantidad total de materia seca por hectárea.



**Figura 13.** Diagrama de la toma de muestra para las raíces.

Se aplicó el modelo matemático establecido por el Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF) (2009).

$$CR = ((10000 \times P_{SR}) / 0.25) / 1000 \dots (3)$$

Donde:

CR : Carbono en las raíces (t C ha<sup>-1</sup>)

P<sub>SR</sub> : Peso seco de las raíces (kg)

0.25 : Constante para parcelas de 0.5m x 0.5m

10000 : Constante

1000 : Constante

### 3.2.3.11. Estimar el contenido de carbono total almacenado en el suelo

Para calcular el carbono total almacenado, se sumó el carbono de las hojarascas, raíces y del suelo.

$$CT = CH + CR + COS... (4)$$

Donde:

CT : Carbono total (t C ha<sup>-1</sup>)

CH : Carbono en hojarascas

CR : Carbono en raíces

COS : Carbono en el suelo

### 3.2.3.12. Estimar el contenido de dióxido de carbono almacenado en el suelo

Para estimar la cantidad total de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo, se multiplican los valores obtenidos de carbono por un factor de conversión de 3.67. Según Jumbo *et al.* (2018), una tonelada de carbono equivale al secuestro de 3.67 toneladas de CO<sub>2</sub>, por lo que se aplica la siguiente ecuación:

$$CO_2 = CC * 3.67... (5)$$

Donde:

CC = Contenido de Carbono (t C/ha)

3.67 = Factor de conversión de carbono a CO<sub>2</sub>

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

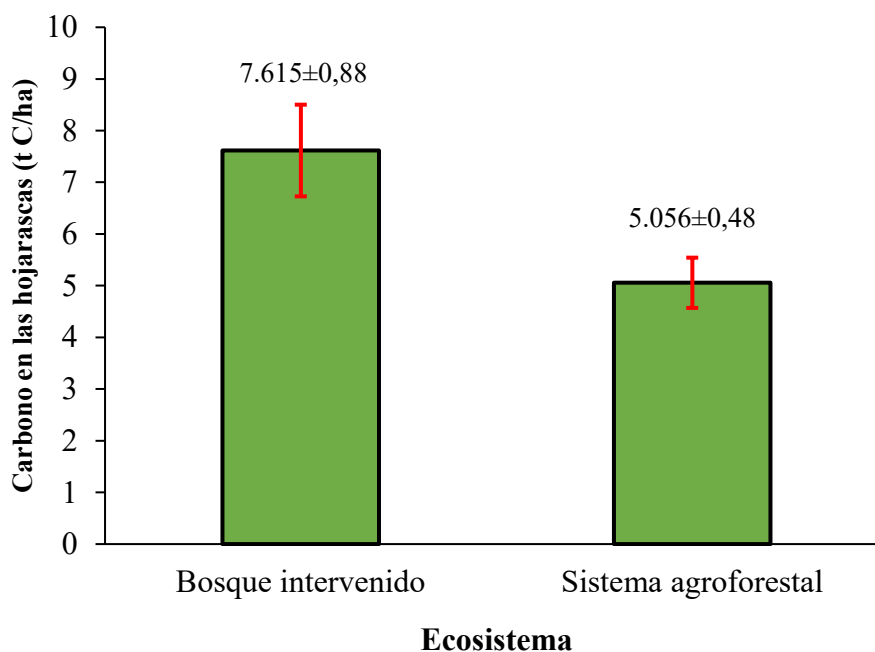
### 4.1. Contenido de carbono almacenado en el suelo

#### 4.1.1. Hojarasca

La Tabla 6 muestra que el bosque intervenido presenta un mayor contenido promedio de carbono almacenado en las hojarascas (7,615 t C/ha) en comparación con el sistema agroforestal (5,056 t C/ha), con una mayor variabilidad en el bosque (desviación estándar = 0,887; CV = 11,648%) que en el sistema agroforestal (desviación estándar = 0,486; CV = 9,612%), lo que sugiere diferencias en la acumulación de carbono entre ambos ecosistemas.

**Tabla 6.** Estadísticos del carbono almacenado en las hojarascas

Ecosistema	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bosque intervenido	10	7,615	0,887	11,648
Sistema agroforestal	10	5,056	0,486	9,612



**Figura 14.** Comparación de medias del carbono almacenado en las hojarascas

La Figura 14 compara visualmente las medias de carbono almacenado en la hojarasca entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal, destacando la superioridad del bosque frente al sistema agroforestal, lo que sugiere que la estructura y composición del

bosque favorecen una mayor acumulación de materia orgánica. La mayor variabilidad en el bosque podría asociarse a factores como la heterogeneidad en la descomposición de la hojarasca o la diversidad de especies vegetales, mientras que el sistema agroforestal, con menor variación, refleja una dinámica más homogénea, posiblemente debido a un manejo antropogénico más controlado.

La prueba de Levene (Tabla 7) evaluó la homogeneidad de varianzas del carbono almacenado en las hojarasca. Los resultados mostraron un valor p de 0,081, el cual supera el nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ). Por tanto, se acepta la hipótesis nula de igualdad de varianzas, confirmando que las varianzas del carbono almacenado entre los grupos son homogéneas. Este hallazgo valida el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad necesario para la aplicación de la prueba t de Student.

**Tabla 7.** Prueba de Levene para el carbono almacenado en las hojarasca

Variable	Prueba de Levene	
	F	Sig
Carbono en hojarasca (t C/ha)	3,424	0,081

Con respecto a la Tabla 8, la prueba t de Student ( $t = 7,997$ ;  $p < 0,001$ ) reveló diferencias estadísticamente significativas en el carbono almacenado entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal ( $\alpha = 0,05$ ). Los resultados confirman una mayor acumulación de carbono en el bosque intervenido, evidenciando el efecto del tipo de cobertura vegetal sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en la hojarasca. Este hallazgo resalta el papel clave de los bosques intervenidos en la captura de carbono, incluso bajo perturbación, en comparación con sistemas agroforestales. Sin embargo, es importante considerar que, aunque el bosque almacena más carbono, su mayor variabilidad podría indicar inestabilidad en el proceso de secuestro, mientras que los sistemas agroforestales, aunque menos eficientes, podrían ofrecer un almacenamiento más predecible.

**Tabla 8.** Prueba T de Student para el carbono almacenado en las hojarasca

Variable	GL	Valor - T	Sig
Carbono en hojarasca (t C/ha)	18	7,997	0,000

Los resultados de esta investigación coinciden con los reportados por Bringas (2011), quien encontró una mayor cantidad de carbono en las hojarasca en un bosque

secundario (6,93 t C/ha) en comparación con un sistema agroforestal con cacao + laurel (5,14 t C/ha). La similitud entre estos valores y los obtenidos en el presente estudio sugiere que existe un patrón consistente en el comportamiento del almacenamiento de carbono en hojarasca entre bosques y sistemas agroforestales en diferentes contextos geográficos.

De manera similar, Valdés *et al.* (2022) reportaron mayor contenido de carbono en hojarasca en un bosque mesófilo de montaña (5,04 t C/ha) comparado con un sistema agroforestal con café (2,95 t C/ha). Aunque los valores absolutos difieren de los encontrados en este estudio, la tendencia de mayor acumulación de carbono en ecosistemas boscosos se mantiene constante.

Contrariamente a los resultados obtenidos, Díaz *et al.* (2015) reportaron una mayor concentración de carbono en las hojarasca en un sistema agroforestal con café (15,53 t C/ha) respecto a un bosque secundario (5,39 t C/ha). Esta discrepancia puede atribuirse a diferencias en las condiciones ambientales, prácticas de manejo específicas del sistema agroforestal, composición de especies, o metodologías de muestreo y análisis empleadas. Es importante considerar que los sistemas agroforestales pueden presentar gran variabilidad en su estructura y composición dependiendo de las especies cultivadas, la densidad de plantación y las prácticas de manejo implementadas.

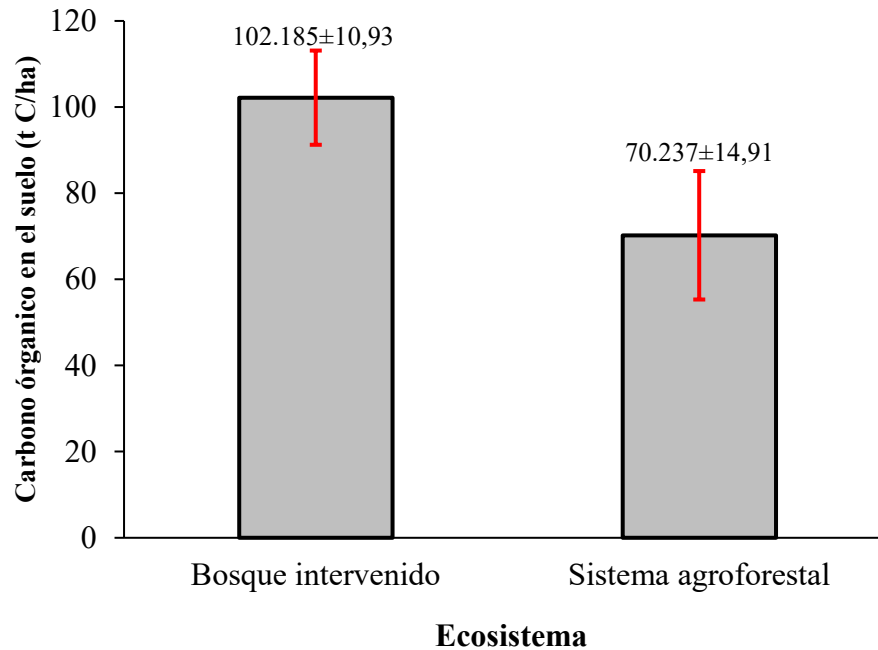
Los estudios revisados muestran una considerable variabilidad en los valores de carbono almacenado en hojarasca. Correa (2015) reportó un promedio de 4,04 t C/ha en bosques, mientras que Fonseca *et al.* (2008) encontraron valores menores (1,9 t C/ha) en bosques secundarios. En sistemas agroforestales, la variabilidad es igualmente notable; Espinoza *et al.* (2012) reportaron valores de 0,9 t C/ha en sistemas agroforestales con café en México, mientras que Guzmán (2024) encontró 2,99 t C/ha en condiciones similares.

#### **4.1.2. Suelo**

Los resultados de la Tabla 9 evidencian que el bosque intervenido registra un contenido promedio de carbono orgánico del suelo superior (102,18 t C/ha) al sistema agroforestal (70,23 t C/ha). En términos de variabilidad, el sistema agroforestal presenta mayor heterogeneidad (DE = 14,91; CV = 21,22%) comparado con el bosque intervenido (DE = 10,93; CV = 10,70%), lo que sugiere diferencias en la acumulación de carbono entre ambos ecosistemas.

**Tabla 9.** Estadísticos del carbono orgánico almacenado en el suelo

Ecosistema	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bosque intervenido	4	102,185	10,939	10,705
Sistema agroforestal	4	70,237	14,911	21,229

**Figura 15.** Comparación de medias del carbono almacenado en el suelo

La Figura 15 ilustra la comparación de las medias de carbono orgánico almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal, confirmando la mayor capacidad de almacenamiento del bosque intervenido respecto al sistema agroforestal. Esta diferencia puede atribuirse a que la estructura forestal y su diversidad de especies promueven una mayor deposición de residuos orgánicos y condiciones microclimáticas más favorables para la descomposición y acumulación de materia orgánica en el suelo. La menor variabilidad relativa (CV) en el bosque sugiere una distribución más homogénea del carbono, posiblemente debido a condiciones más estables en la descomposición de materia orgánica. En cambio, el sistema agroforestal presenta mayor dispersión, lo que podría reflejar un impacto más variable de prácticas agrícolas o manejo del suelo.

La prueba de Levene (Tabla 10) evaluó la homogeneidad de varianzas del carbono orgánico almacenado en el suelo entre los sistemas estudiados. El análisis arrojó un valor p de 0,741, superior al nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ), por lo que se acepta

la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Esto confirma que no existen diferencias significativas entre las varianzas de ambos grupos, validando el supuesto de homocedasticidad requerido para la posterior aplicación de la prueba t de Student.

**Tabla 10.** Prueba de Levene para el carbono almacenado en el suelo

Variable	Prueba de Levene	
	F	Sig
Carbono en el suelo (t C/ha)	0,121	0,741

Con respecto a la Tabla 11, la prueba t de Student ( $t = 3,45$ ;  $p < 0,014$ ) reveló diferencias estadísticamente significativas en el carbono orgánico almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal ( $\alpha = 0,05$ ). Estos hallazgos sugieren que el bosque intervenido presenta una mayor capacidad de acumulación de carbono orgánico en el suelo en comparación con el sistema agroforestal evaluado. Esta diferencia podría atribuirse a factores como la mayor densidad de vegetación, la menor perturbación antrópica o la retención de materia orgánica en el bosque intervenido, aspectos que favorecen procesos de descomposición más lentos y una mayor incorporación de carbono al suelo. Por el contrario, el sistema agroforestal, aunque contribuye a la conservación de nutrientes, podría estar sujeto a prácticas de manejo que reducen la acumulación de carbono a largo plazo, como la remoción periódica de biomasa o el laboreo del suelo.

**Tabla 11.** Prueba T de Student para el carbono almacenado en el suelo

Variable	GL	Valor - T	Sig
Carbono en el suelo (t C/ha)	6	3,455	0,014

Los resultados obtenidos son consistentes con diversos estudios que han evaluado el carbono orgánico en suelos de diferentes ecosistemas. Valdés *et al.* (2022) encontraron mayor contenido de carbono orgánico en el suelo en un bosque mesófilo de montaña (107,99 t C/ha) comparado con un sistema agroforestal con café (62,05 t C/ha). La similitud entre estos valores y los obtenidos en el presente estudio (102,18 t C/ha en bosque) sugiere un patrón consistente en el comportamiento del almacenamiento de carbono en suelos forestales.

De manera similar, Chuquizuta *et al.* (2016) reportaron mayor concentración de carbono orgánico en suelos de bosque (113,94 t C/ha) en comparación con

sistemas agroforestales con cacao (55,45 t C/ha). Vela *et al.* (2024) también confirmaron esta tendencia, encontrando mayor contenido de carbono orgánico en suelos de bosque secundario (62,48 t C/ha) que en sistemas agroforestales con cacao (53,54 t C/ha).

En ecosistemas forestales, los valores de carbono orgánico del suelo obtenidos en este estudio son comparables a los reportados por Valdés *et al.* (2022) y Chuquizuta *et al.* (2016), pero superiores a los encontrados por Vela *et al.* (2024) y Cuellar *et al.* (2015) quien reportó 71 t C/ha. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en las condiciones climáticas, tipo de suelo, altitud, y características específicas de cada ecosistema forestal.

Para sistemas agroforestales, el contenido de carbono orgánico obtenido (70,23 t C/ha) es similar a lo reportado por Ortega (2023) con 65,66 t C/ha y Enríquez (2018) con 71,77 t C/ha. Sin embargo, los valores son superiores a los encontrados por Guzmán (2024) con 41,14 t C/ha, Espinoza *et al.* (2011) con 58 t C/ha, y Hernández *et al.* (2021) con 42,8 t C/ha. Esta variabilidad en sistemas agroforestales puede estar relacionada con diferencias en las prácticas de manejo, composición de especies, densidad de plantación y edad del sistema.

Castañeda & Montes (2017) sugieren que los valores más elevados de carbono orgánico del suelo bajo vegetación natural pueden deberse a la mayor protección que brinda la cobertura vegetal a la superficie del suelo. En sitios con coberturas densas como musgos y especies de arbustos, que aíslan el suelo de factores como la precipitación y la radiación solar directa, es posible encontrar mayores cantidades de carbono orgánico debido a una menor descomposición de la materia orgánica.

La diversidad florística, la edad y la densidad poblacional de cada estrato vegetal influyen significativamente en la capacidad de almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales (Schulze *et al.*, 2000). Los bosques, al presentar una estructura vertical más compleja y mayor diversidad de especies, generan condiciones microclimáticas más favorables para la acumulación de materia orgánica en el suelo.

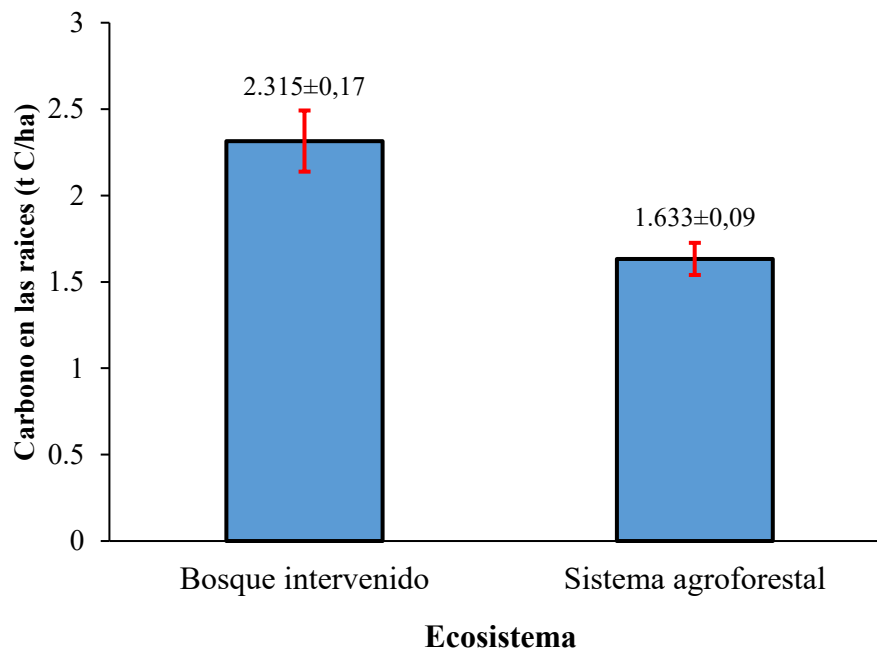
Los ecosistemas forestales se caracterizan por una mayor producción de biomasa y el aporte continuo de materia orgánica al suelo, lo que favorece la acumulación de carbono. Este proceso incluye la caída constante de hojarasca, ramas, frutos y otros materiales orgánicos que se incorporan al suelo a través de procesos de descomposición (Gómez *et al.*, 2021)

### 4.1.3. Raíces

Los datos de la Tabla 12 revelan que el bosque intervenido registra un mayor contenido promedio de carbono almacenado en las raíces (2,31 t C/ha) comparado con el sistema agroforestal (1,63 t C/ha). En cuanto a la variabilidad, el bosque intervenido presenta mayor heterogeneidad (DE = 0,17; CV = 7,64%) respecto al sistema agroforestal (DE = 0,09; CV = 5,69%), lo que sugiere diferencias en la acumulación de carbono entre ambos ecosistemas.

**Tabla 12.** Estadísticos del carbono almacenado en las raíces

Ecosistema	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bosque intervenido	4	2,315	0,177	7,645
Sistema agroforestal	4	1,633	0,093	5,695



**Figura 16.** Comparación de medias del carbono almacenado en las raíces

La Figura 16 presenta una comparación gráfica entre las medias de carbono almacenado en las raíces del bosque intervenido y el sistema agroforestal, donde se observa que el bosque intervenido presenta una mayor capacidad de almacenamiento de carbono radicular en comparación con el sistema agroforestal. Esta diferencia puede explicarse por la mayor biomasa radical característica de los ecosistemas forestales, donde la diversidad de especies arbóreas y arbustivas favorece el desarrollo de sistemas radiculares más extensos y

complejos, incrementando así el potencial de acumulación de carbono subterráneo. La menor variabilidad en ambos sistemas ( $CV < 8\%$ ) indica patrones consistentes, aunque el bosque presenta ligeramente mayor dispersión, posiblemente por la diversidad de especies arbóreas con sistemas radicales heterogéneos.

La prueba de Levene (Tabla 13) evaluó la homogeneidad de varianzas del carbono almacenado en las raíces entre los sistemas estudiados. El análisis arrojó un valor  $p$  de 0,354, superior al nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ), por lo que se acepta la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Esto confirma que no existen diferencias significativas entre las varianzas de ambos grupos, validando el supuesto de homocedasticidad requerido para la posterior aplicación de la prueba  $t$  de Student.

**Tabla 13.** Prueba de Levene para el carbono almacenado en las raíces

Variable	Prueba de Levene	
	F	Sig
Carbono en raíces (t C/ha)	1,008	0,354

En relación con la Tabla 14, la prueba  $t$  de Student ( $t = 6,789$ ;  $p < 0,001$ ) demostró diferencias estadísticamente significativas en el carbono almacenado en las raíces entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal ( $\alpha = 0,05$ ). Estos resultados evidencian una mayor acumulación de carbono en el sistema radicular del bosque intervenido en comparación con el sistema agroforestal. Los resultados confirman una mayor acumulación de carbono en el bosque intervenido, lo cual puede atribuirse a varios factores ecológicos y estructurales. En primer lugar, la diversidad y densidad de especies arbóreas en el bosque intervenido favorece el desarrollo de sistemas radiculares más extensos y profundos, lo que incrementa significativamente la biomasa subterránea. Adicionalmente, la estructura del suelo en el bosque mantiene condiciones más favorables para el crecimiento radicular, incluyendo mejor porosidad, mayor contenido de materia orgánica y una red micorrizal más desarrollada.

**Tabla 14.** Prueba T de Student para el carbono almacenado en las raíces

Variable	GL	Valor - T	Sig
Carbono en raíces (t C/ha)	6	6,789	0,001

Vela *et al.* (2024) encontraron mayor contenido de carbono en las raíces en un bosque secundario (18,14 t C/ha) comparado con un sistema agroforestal (10,65 t C/ha).

Aunque los valores absolutos difieren significativamente de los obtenidos en este estudio, el patrón de mayor acumulación de carbono en ecosistemas forestales se mantiene constante. Esta diferencia en los valores absolutos puede atribuirse a varios factores metodológicos y ecológicos, incluyendo diferencias en la profundidad de muestreo, el diámetro mínimo de raíces considerado, las condiciones climáticas y edáficas, así como la composición específica de especies en cada ecosistema.

Sin embargo, Estrada (2023) encontró mayor concentración de carbono en las raíces en un sistema agroforestal con cacao (4,12 t C/ha) comparado con una plantación forestal de teca (3,62 t C/ha). Este resultado contrasta con el patrón general observado en otros estudios y sugiere que las características específicas del sistema agroforestal y el tipo de plantación forestal pueden influir significativamente en la acumulación de carbono radicular.

Los estudios revisados muestran una considerable variabilidad en los valores de carbono almacenado en raíces, lo que refleja la complejidad inherente a la evaluación de la biomasa radicular. En ecosistemas forestales, Cuellar *et al.* (2015) reportaron un valor de 3,26 t C/ha en un bosque intervenido, mientras que Fonseca *et al.* (2008) encontraron un valor de 3,5 t C/ha en un bosque secundario. Estos valores son superiores a los obtenidos en el presente estudio, lo que puede indicar diferencias en las metodologías de muestreo o en las características específicas de cada ecosistema.

En sistemas agroforestales, la variabilidad es parecido, Guzmán (2024) encontró un valor de 6,41 t C/ha en sistemas agroforestales, mientras que Trelles (2012) reportó un valor menor de 1,33 t C/ha. El valor obtenido en este estudio (1,63 t C/ha) se encuentra más cercano al reportado por Trelles (2012).

La mayor acumulación de carbono en el sistema radicular del bosque intervenido puede atribuirse a la diversidad y densidad de especies arbóreas, que favorece el desarrollo de sistemas radiculares más extensos y profundos. Esta diversidad resulta en una mayor biomasa subterránea total, incrementando significativamente la capacidad de almacenamiento de carbono.

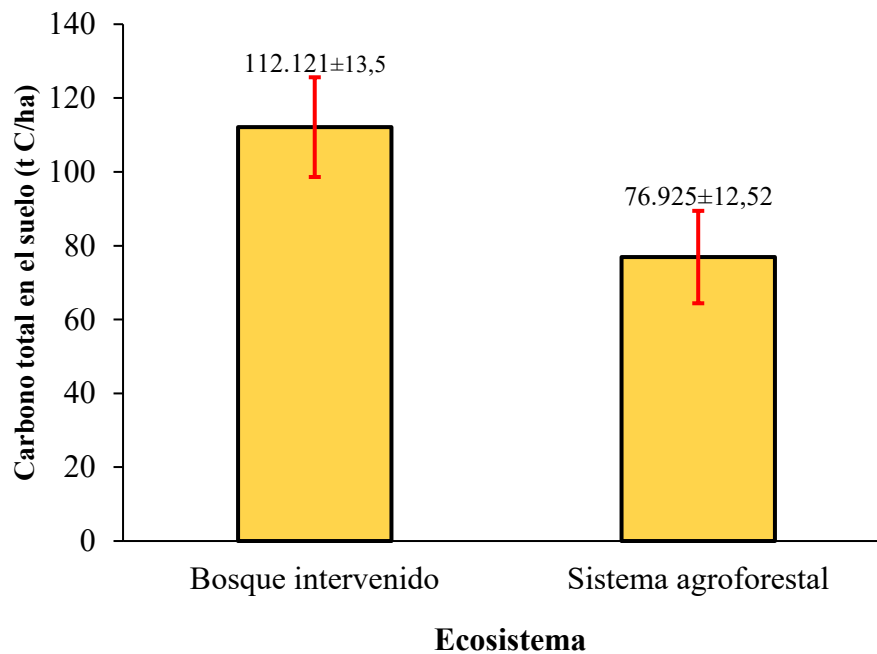
Los bosques mantienen condiciones más favorables para el crecimiento radicular, incluyendo mejor porosidad, mayor contenido de materia orgánica y una red micorrizal más desarrollada. Estos factores contribuyen no solo al crecimiento de las raíces sino también a su supervivencia y capacidad de almacenamiento de carbono a largo plazo.

#### 4.2. Contenido de carbono total almacenado en el suelo

La Tabla 15 muestra que el bosque intervenido presenta un mayor contenido promedio de carbono total almacenado en el suelo (112,12 t C/ha) en comparación con el sistema agroforestal (76,92 t C/ha), con una mayor variabilidad en el sistema agroforestal (desviación estándar = 12,52; CV = 16,27%) que en el bosque (desviación estándar = 13,51; CV = 12,04%), lo que sugiere diferencias en la acumulación de carbono entre ambos ecosistemas.

**Tabla 15.** Estadísticos del carbono total almacenado en el suelo

Ecosistema	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bosque intervenido	4	112,121	13,505	12,045
Sistema agroforestal	4	76,925	12,522	16,278



**Figura 17.** Comparación de medias del carbono total almacenado en el suelo

La Figura 17 compara visualmente las medias de carbono total almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal, destacando la superioridad del bosque frente al sistema agroforestal, lo que sugiere que la estructura y composición del ecosistema forestal favorecen una mayor incorporación y retención de almacenamiento de carbono edáfico. La mayor concentración de carbono en el bosque intervenido refleja su capacidad para mantener reservorios orgánicos más estables, posiblemente debido a una menor

perturbación y mayor aporte de biomasa. El sistema agroforestal, aunque con valores absolutos menores, presenta mayor variabilidad, lo que sugiere que prácticas de manejo podrían estar generando heterogeneidad en la distribución del carbono.

La prueba de Levene (Tabla 16) evaluó la homogeneidad de varianzas del carbono total almacenado en el suelo. Los resultados mostraron un valor p de 0,808, el cual supera el nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ). Por tanto, se acepta la hipótesis nula de igualdad de varianzas, confirmando que las varianzas del carbono almacenado entre los grupos son homogéneas. Este hallazgo valida el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad necesario para la aplicación de la prueba t de Student.

**Tabla 16.** Prueba de Levene para el carbono total almacenado en el suelo

Variable	Prueba de Levene	
	F	Sig
Carbono total (t C/ha)	0,064	0,808

Con respecto a la Tabla 17, la prueba t de Student ( $t = 3,77$ ;  $p < 0,009$ ) reveló diferencias estadísticamente significativas en el carbono total almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal ( $\alpha = 0,05$ ). Los resultados confirman una mayor acumulación de carbono en el bosque intervenido que en el sistema agroforestal. Los resultados confirman una mayor acumulación de carbono en el bosque intervenido, hallazgo que se alinea con los principios fundamentales de la ecología del carbono en ecosistemas forestales. Esta superioridad en el almacenamiento de carbono edáfico puede atribuirse a la compleja red de procesos biogeoquímicos que caracterizan a los sistemas forestales, donde la deposición continua de material orgánico, la actividad microbiana especializada y las condiciones microclimáticas estables favorecen la formación y estabilización de la materia orgánica del suelo.

El bosque intervenido presenta ventajas estructurales y funcionales que explican estos resultados. La cobertura arbórea permanente genera un microambiente que regula la temperatura y humedad del suelo, condiciones óptimas para los procesos de descomposición controlada y humificación. Además, el aporte constante de hojarasca, ramas, frutos y exudados radiculares proporciona un flujo continuo de material orgánico que alimenta las reservas de carbono del suelo. La arquitectura radicular diversa y estratificada contribuye también a la incorporación de carbono a diferentes profundidades del perfil edáfico.

Por el contrario, el sistema agroforestal, aunque representa una alternativa sostenible de uso del suelo, presenta limitaciones inherentes que restringen la acumulación de carbono total. Las prácticas de manejo agrícola, incluyendo el laboreo ocasional, la cosecha de productos y la perturbación periódica del suelo, interfieren con los procesos naturales de acumulación de materia orgánica. La menor densidad de cobertura arbórea en comparación con el bosque resulta en un aporte reducido de residuos orgánicos y en condiciones microclimáticas menos estables.

**Tabla 17.** Prueba T de Student para el carbono total almacenado en el suelo

Variable	GL	Valor - T	Sig
Carbono total (t C/ha)	6	3,777	0,009

Los resultados obtenidos son consistentes con diversos estudios que han evaluado el carbono total almacenado en diferentes ecosistemas. Estrada (2023) encontró mayor concentración de carbono total en una plantación de teca comparada con una plantación de cacao en el predio de Tulumayo. De manera similar, Chuquizuta et al. (2016) reportaron mayor concentración de carbono total en un bosque que en una plantación de cacao en la región de San Martín. Valdés et al. (2022) también confirmaron mayor contenido de carbono total en un bosque mesófilo de montaña comparado con un sistema agroforestal con café.

Los valores de carbono total obtenidos en el bosque intervenido (112,12 t C/ha) se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para ecosistemas forestales similares. Cuellar et al. (2015) encontraron un total de carbono almacenado en un bosque intervenido de 90,56 t C/ha, valor inferior al obtenido en este estudio, lo que podría indicar diferencias en las condiciones específicas del bosque o en la metodología empleada.

Por otro lado, Mena et al. (2011) reportaron un total de carbono almacenado en un bosque secundario de 117,2 t C/ha, valor ligeramente superior al encontrado en esta investigación. Esta variabilidad es esperada considerando las diferencias en edad del bosque, composición de especies, condiciones climáticas y características edáficas entre diferentes sitios de estudio.

El contenido de carbono total almacenado en el sistema agroforestal (76,92 t C/ha) es comparable con los valores reportados en otros estudios. Corral *et al.* (2006) indicaron que los suelos de sistemas agroforestales con café y cacao son depósitos importantes de carbono, con valores de 72,5 y 75,7 t C/ha, respectivamente. Estos valores son muy similares a

los obtenidos en el presente estudio, sugiriendo consistencia en la capacidad de almacenamiento de carbono de estos sistemas.

Guzmán (2024) encontró valores de carbono total almacenado en el suelo de 71,34 y 82,05 t C/ha en sistemas agroforestales con café y cacao, respectivamente. El rango de estos valores engloba el resultado obtenido en esta investigación, confirmando que los sistemas agroforestales mantienen una capacidad considerable de almacenamiento de carbono, aunque inferior a los ecosistemas forestales.

La superioridad del bosque intervenido en el almacenamiento de carbono edáfico puede atribuirse a la compleja red de procesos biogeoquímicos que caracterizan a los sistemas forestales. La deposición continua de material orgánico, la actividad microbiana especializada y las condiciones microclimáticas estables favorecen la formación y estabilización de la materia orgánica del suelo.

Por otro lado, aunque los sistemas agroforestales presentan menor capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, siguen representando una alternativa importante para la captura de carbono en paisajes agrícolas. La optimización de las prácticas de manejo en estos sistemas podría mejorar su capacidad de secuestro de carbono, contribuyendo a estrategias de mitigación del cambio climático.

### 4.3. Contenido de dióxido de carbono almacenado en el suelo

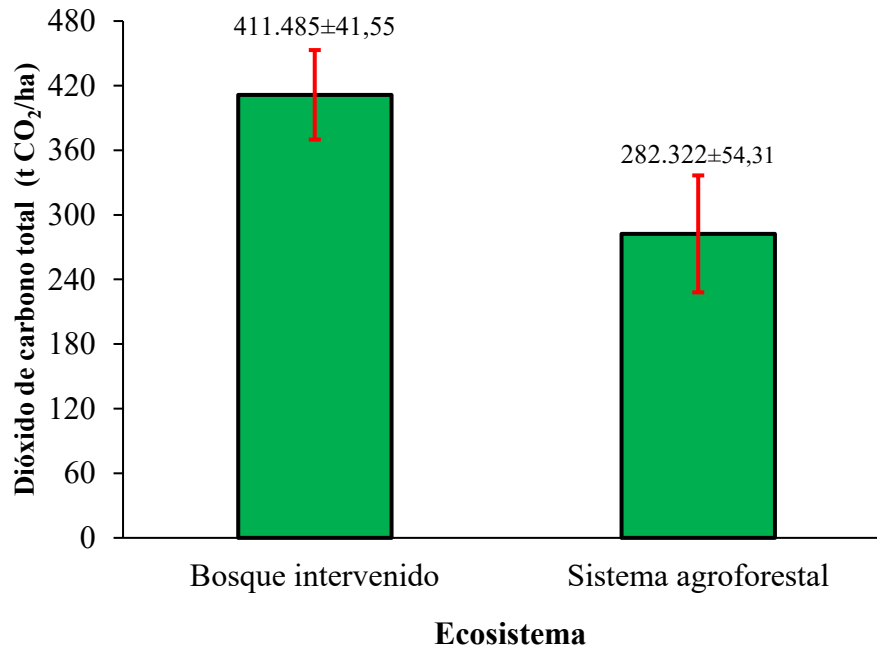
Los resultados de la Tabla 18 evidencian que el bosque intervenido registra un contenido promedio de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo superior (411,48 t C/ha) al sistema agroforestal (282,32 t C/ha). En términos de variabilidad, el bosque intervenido presenta mayor heterogeneidad (DE = 41,55; CV = 10,09%) comparado con el sistema agroforestal (DE = 54,31; CV = 19,23%), lo que sugiere diferencias en la acumulación de carbono entre ambos ecosistemas.

**Tabla 18.** Estadísticos del dióxido de carbono almacenado en el suelo

Ecosistema	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bosque intervenido	4	411,485	41,556	10,099
Sistema agroforestal	4	282,322	54,316	19,239

La Figura 18 ilustra la comparación de las medias de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal, confirmando la mayor capacidad de

almacenamiento del bosque intervenido respecto al sistema agroforestal. La diferencia sugiere que los bosques intervenidos mantienen mayor capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, posiblemente por mayor biomasa y actividad microbiana. La mayor variación en el sistema agroforestal (CV casi el doble) podría reflejar impactos diferenciales del manejo agrícola en la descomposición de materia orgánica.



**Figura 18.** Comparación de medias del dióxido de carbono almacenado en el suelo

La prueba de Levene (Tabla 19) evaluó la homogeneidad de varianzas del CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo entre los sistemas estudiados. El análisis arrojó un valor p de 0,808, superior al nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ), por lo que se acepta la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Esto confirma que no existen diferencias significativas entre las varianzas de ambos grupos, validando el supuesto de homocedasticidad requerido para la posterior aplicación de la prueba t de Student.

**Tabla 19.** Prueba de Levene para el dióxido de carbono almacenado en el suelo

Variable	Prueba de Levene	
	F	Sig
Dióxido de carbono total (t CO <sub>2</sub> /ha)	0,064	0,808

Con respecto a la Tabla 20, la prueba t de Student ( $t = 3,45$ ;  $p < 0,014$ ) reveló diferencias estadísticamente significativas en el CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo entre el bosque intervenido y el sistema agroforestal ( $\alpha = 0,05$ ). Estos hallazgos sugieren que el bosque

intervenido presenta una mayor capacidad de acumulación de carbono orgánico en el suelo en comparación con el sistema agroforestal evaluado.

**Tabla 20.** Prueba T de Student para el dióxido de carbono almacenado en el suelo

<b>Variable</b>	<b>GL</b>	<b>Valor - T</b>	<b>Sig</b>
Dióxido de carbono total (t CO <sub>2</sub> /ha)	6	3,777	0,009

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Paniagua *et al.* (2021), quienes encontraron valores entre 243 y 518 t CO<sub>2</sub>/ha en un bosque secundario, lo que sugiere que nuestros resultados son consistentes con los patrones de almacenamiento de carbono observados en ecosistemas forestales similares.

En contraste, los valores obtenidos resultan significativamente menores al reportado por Sarango & Tenempaguay (2020) en un bosque de pino (1,219.68 t CO<sub>2</sub>/ha). Esta notable diferencia puede atribuirse a diversos factores, entre los que destacan las características específicas del ecosistema, las condiciones edafoclimáticas particulares de cada sitio y el tiempo de establecimiento de las plantaciones forestales.

## V. CONCLUSIONES

1. El bosque intervenido demostró una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en comparación con el sistema agroforestal en todos los compartimentos evaluados: el contenido de carbono en hojarasca fue de 7.62 t C/ha frente a 5.06 t C/ha, el carbono orgánico en el suelo alcanzó 102.18 t C/ha en contraste con 70.23 t C/ha, y el carbono almacenado en las raíces presentó 2.32 t C/ha comparado con 1.63 t C/ha.
2. El carbono total almacenado (incluyendo hojarasca, raíces y suelo) fue significativamente mayor en el bosque intervenido (112.12 t C/ha) que en el sistema agroforestal (76.92 t C/ha).
3. La cantidad de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo fue significativamente mayor en el bosque intervenido (411.48 t CO<sub>2</sub>/ha) que en el sistema agroforestal (282.32 t CO<sub>2</sub>/ha).

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Realizar estudios complementarios que evalúen otras fracciones de carbono, como la biomasa aérea, para obtener una estimación más completa del carbono almacenado en los dos tipos de ecosistema.
2. Ejecutar estudios de estimación económica para realizar la valorización por la fijación y almacenamiento de carbono.
3. Considerar realizar estudios evaluando la cantidad de carbono almacenado a mayor profundidad (hasta 0.5 o 1 m).
4. Emplear otras fórmulas para determinar el contenido de carbono orgánico del suelo para ver si existen diferencias entre formulas aplicadas.

## VII. REFERENCIAS

- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). (25 de febrero de 2025). Ciclo del carbono. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>
- Aguilera, S. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo, 77-85.
- Bringas, H. (2011). Estimación del carbono almacenado en un Sistema Agroforestal de Cacao (*Theobroma cacao* L.) comparado con un bosque secundario de tres edades. Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.
- Carrera, C. (2014). El calentamiento global y su impacto antitropical en 100 años. Boletín del Colegio de Geógrafos del Perú, 53-62.
- Castañeda, A., & Montes, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. Entramado, 13(1), 210-221.
- Chuquizuta, P., Fachin, G., Tello, C., & Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. RINDERESU, 1(2), 57-67.
- Condor, J. (2019). Carbono orgánico del suelo en diferentes unidades fisiográficas del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) Tingo María – Perú. Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú. Obtenido de [https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/2057/TS\\_JJCM\\_-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/2057/TS_JJCM_-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Corral R., Duicela L. Masa H. 2006 Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábico y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano [En línea] (<http://www.cofenac.org/documentos/Resumenes-Carbono enSAF.pdf>).
- Correa, J. (2015). Almacenamiento de carbono en bosques naturales en la microcuenca El Padmi, provincia de Zamora Chinchipe. Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/items/04148f0a-33a9-440c-a7e1-f452967a9788>
- Costantini, A., Pérez, M., Busto, M., González, F., & Cosentino, V. (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. Ciencia e Investigación, 68(5), 47-54. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/160465>

- Cuellar, J., Salazar, E., & Dietz, J. (2015). Patrón de cambios del carbono almacenado en el ecosistema debido al cambio de uso del bosque tropical en la Cuenca de Aguaytía, Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA, Lima.
- Díaz, P., Fachin, G., Tello, C., Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable - RINDERESU*, 1(2), 57-67.
- Enriquez, L. (2018). Determinación de captura de carbono en suelos de un sistema. Tesis pregrado, Universidad Peruna Unión, Juliaca. Obtenido de <https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/48d367ab-1c14-42a5-a4c6-ae5574943e2b/content>
- Enriquez, L. (2018). Determinación de captura de carbono en suelos de un sistema agroforestal con café (*Coffea arábica*) en el Valle Esquilaya - Región Puno, 2018. Tesis de grado, Universidad Peruana Unión, Juliaca.
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L, Vázquez, A., Torres, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>
- Estrada, Y. (2023). Carbono orgánico del suelo en cinco sistemas de uso en el centro de investigación y producción tulumayo anexo la Divisoria (CIPTALD), Pueblo Nuevo. Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.
- FAO. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. Roma.
- FAO. (2017). Carbono Orgánico del Suelo - el potencial oculto. Roma.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H., & Leblanc, H. (2006). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*(46), 57-64.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO 2002. Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos naturales mundiales de suelos – 96. Roma 76 p.
- Gómez, J., Etchevers, J., Monterroso, A., Campo, J., Paustian, K., & Asensio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y bosques*, 27(4), 1-16.

- Guevara, C. (2022). Estimación de la Reserva de Carbono Almacenado en el Área de Conservación Municipal Bosque de Huamantanga – Jaén. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén, Jaén. Obtenido de <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/533>
- Guzman, R. (2024). Stock de carbono orgánico en sistemas agroforestal de café (*Coffea arábica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en el distrito de Soritor. Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.
- Hernández, H., Andrade, H., Suárez, J., Sánchez, J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, G., . . . Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Biología Tropical*, 69(1), 352-368.
- Hernández, H., Andrade, H., Suárez, J., Sánchez, J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, G., . . . Casanovés, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368.
- Honorio, E., & Baker, T. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana, Lima.
- International Plant Protection Convention IPPC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. . Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra.
- Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del carbono. En *Cambio, climático: una visión desde México* (págs. 77-85).
- Kane, D. (2015). Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices.
- Manchabajoy, P., Andrade, D., & Castillo, A. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño Carbon capture in coffee production systems in the department of Nariño Juan Pablo Manchabajoy Cañar †1 Danita Andrade Díaz2 Álvaro José Castillo Marín3 DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358> *Ciencia y Agricultura*, 19(1), 28-44. doi: <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>
- Martín, J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18(1), 33-46. Obtenido de <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/638fb437-0a3d-4dca-af35-d0dae3a9621/content>

- Mena, V., Andrade, H., & Navarro, C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en gradientes altitudinales en Costa Rica. *Agroforesteria Neotropica*, 1, 1-12.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego MIDAGRI. (2021). *Sistemas Agroforestales*. Lima: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre.
- Ministerio del Ambiente. (2023). Obtenido de Infocarbono: <https://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/>
- Municipalidad Distrital de Santa Rosa de Alto Yanajanca. (2020). Mejoramiento de los servicios de agua potable en la localidad de San Miguel de Alto Yanajanca (San Miguel) del distrito de Santa Rosa de Alto Yanajanca - Provincia de Marañon -Departamento de Huánuco.
- NASA. (09 de Julio de 2021). Estudio de la NASA halla que la capacidad de los bosques tropicales para absorber dióxido de carbono disminuye. Obtenido de NASA ciencia: <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/estudio-de-la-nasa-descubre-que-la-capacidad-de-los-bosques-tropicales-para-absorber-dioxido-de-carbono/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*.
- Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA). (2021). *Bosques secundarios: origen, definición, extensión y potencial*.
- Ortega, E., Munguía, R., & Blandón, J. (2023). Carbono almacenado en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en tres municipios de Boaco, Nicaragua. *La Calera*, 23(40), 1-16. doi: <https://doi.org/10.5377/calera.v23i40.16221>
- Paniagua, A., Krupinska, O., Jagdeo, V., & Cooper, W. (2021). Carbon storage estimation in a secondary tropical forest at CIEE Sustainability Center, Monteverde, Costa Rica. *Scientific Reports*, 11(23). Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-021-03004-5#Tab2>
- Peña, C. (2020). *Biología de los suelos amazónicos*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.
- Perez, V. (2023). Carbono almacenado en un sistema agroforestal de *Coffea arábica* (café) en la Divisoria. Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.

Obtenido de <https://repositorio.unas.edu.pe/items/f52b2f93-c553-42fe-8448-b8695-bf618e2>

- Robert, M. (2006). *Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra*. Roma: FAO.
- Rojas, F., Santoyo, G., González, E., Velázquez, A., & Pulido, J. (2017). La Ciencia del Suelo en el Ciclo del Carbono de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(2), 1-28. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/105813>
- Sánchez, R. (2016). *Evaluación del contenido de carbono almacenado en diferentes usos del suelo en las micro cuencas Tecomapa, Somotillo y Río Pire, Condega, Nicaragua 2013-2014*. Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria, Managua.
- Sarango, F., & Tenempaguay, W. (2020). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa área, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la Comuna Paquizhapa (Provincia de Loja)*. Trabajo experimental, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.
- Sistema Nacional de áreas de Conservación (SINAC). (2018). *Zonificación forestal de Costa Rica y estado Poblacional de especies forestales*.
- The International Plant Protection Convention IPPC. (2021). *Cambio Climático 2021: todo el mundo*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Trespacios, J., Blanquicett, C., & Carrillo, P. (2018). *Gases y efecto invernadero*. Suiza.
- Valcárcel, G. (2017). *Calentamiento global y estrategias de comunicación del Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible de la Universidad de Lima: impacto en su comunidad y experiencias en otras universidades*. Trabajo de investigación, Universidad de Lima. Obtenido de <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/4261>
- Valdés, E., Vázquez, L., Tinoco, J., Sánchez, R., Salcedo, E., & Lagunes, E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (28), 287-297.
- Vela, J., Clavo, Z., Villegas, P., & Salto, C. (2024). Contribución de los fragmentos de vegetación al almacenamiento de carbono en paisajes agrícolas de la Amazonía peruana. *Revista peruana de biología*, 31(2), 1-14.

Zamora, M. (2015). Cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 04-07.

Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000500001&-script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000500001&-script=sci_arttext)

Zavala, J., & Vega, L. (2021). Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María. Huánuco: UNHEVAL.

**ANEXOS**

Anexo A: Mapa de ubicación

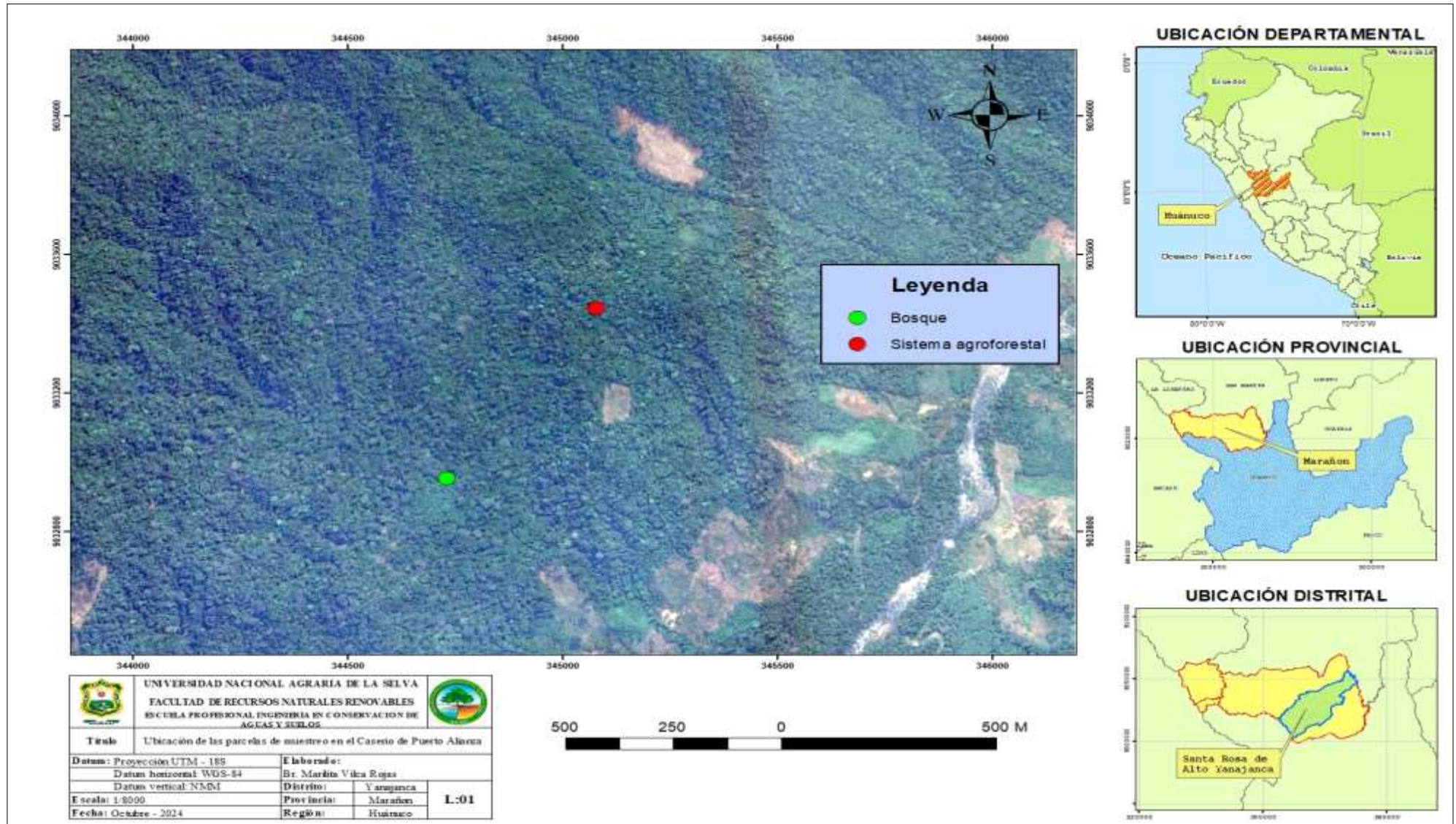


Figura 19. Mapa de ubicación

## Anexo B: Ficha de registro

Tabla 21. Ficha de registro para raíz

Raíz					
Lugar	Punto de muestreo	Profundidad (cm)	Peso fresco total (g)	Peso fresco muestra (g)	Peso seco muestra (g)
Bosque intervenido	BIR1 - 1	0-10			
		0-20			
		20-30			
	BIR1 - 2	0-10			
		0-20			
		20-30			
	BIR2 - 1	0-10			
		0-20			
		20-30			
	BIR2 - 1	0-10			
		0-20			
		20-30			
Sistema agroforestal	SAFR1 - 1	0-10			
		0-20			
		20-30			
	SAFR1- 2	0-10			
		0-20			
		20-30			
	SAFR2 - 1	0-10			
		0-20			
		20-30			
	SAFR2- 2	0-10			
		0-20			
		20-30			

**Tabla 22.** Ficha de registro para hojarasca

<b>Hojarasca</b>				
<b>Lugar</b>	<b>Punto de muestreo</b>	<b>Peso fresco total (gr)</b>	<b>Peso fresco muestra (gr)</b>	<b>Peso seco muestra (gr)</b>
Bosque intervenido	BPH1 - 1			
	BPH1 - 2			
	BPH1 - 3			
	BPH1 - 4			
	BPH1 - 5			
	BPH2 - 1			
	BPH2 - 2			
	BPH2 - 3			
	BPH2 - 4			
	BPH2 - 5			
Sistema agroforestal	SAFH1 - 1			
	SAFH1 - 2			
	SAFH1 - 3			
	SAFH1 - 4			
	SAFH1 - 5			
	SAFH2 - 1			
	SAFH2 - 2			
	SAFH2 - 3			
	SAFH2 - 4			
	SAFH2 - 5			

## Anexo C. Datos generales de la investigación

### Parcela A: Bosque intervenido

Coordenadas : E: 391529 N: 8971233

Altitud : 837 msnm

Área : 500 m<sup>2</sup>

**Tabla 23.** Carbono en las hojarascas del bosque intervenido en la parcela A

Muestra	Peso muestra (gr)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Carbono (t C/ha)	Promedio
A1	200	22,12	13,06	6,77	
A2	200	24,57	12,67	7,76	
A3	200	32,84	16,86	7,79	7,94
A4	200	36,23	17,73	8,17	
A5	200	32,23	14,00	9,21	

**Tabla 24.** Carbono en las raíces del bosque intervenido en la parcela A

Muestra	Profundidad (cm)	Peso fresco raíz (gr)	Peso seco raíz (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Carbono en raíces (ton/ha)
A1	0-10	116,32	0,059	6,523	3,262
	0-20	113,41	0,053	5,837	2,918
	20-30	30,1	0,014	1,516	0,758
A2	0-10	125,58	0,060	6,644	3,322
	0-20	105,46	0,050	5,581	2,791
	20-30	40,17	0,020	2,194	1,097

**Tabla 25.** Carbono orgánico del suelo del bosque intervenido pastizal en la parcela A

Muestra	Profundidad (cm)	M.O. (%)	Carbono (ton/ha)	Promedio (ton/ha)
A1	0-10	2,9	168,21	
	0-20	1,84	106,73	109,05
	20-30	0,9	52,20	
A2	0-10	3,2	185,61	
	0-20	1,98	114,85	113,69
	20-30	0,7	40,60	

**Parcela B: Bosque intervenido**

Coordenadas : E: 391529 N: 8971233  
 Altitud : 837 msnm  
 Área : 500 m<sup>2</sup>

**Tabla 26.** Carbono en las hojarascas del bosque intervenido en la parcela B

Muestra	Peso muestra (gr)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Carbono (t C/ha)	Promedio
B1	200	28,42	15,52	7,32	
B2	200	24,33	13,95	6,98	
B3	200	21,16	13,32	6,35	7,29
B4	200	27,07	15,2	7,12	
B5	200	34,6	15,95	8,68	

**Tabla 27.** Carbono en las raíces del bosque intervenido en la parcela B

Muestra	Profundidad (cm)	Peso fresco raíz (gr)	Peso seco raíz (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Carbono en raíces (ton/ha)
B1	0-10	130,12	0,062	6,941	3,471
	0-20	98,05	0,046	5,099	2,549
	20-30	40,76	0,026	2,887	1,443
B2	0-10	106,12	0,048	5,294	2,647
	0-20	108,42	0,050	5,528	2,764
	20-30	25,07	0,015	1,647	0,823

**Tabla 28.** Carbono orgánico del suelo del bosque intervenido pastizal en la parcela B

Muestra	Profundidad (cm)	M.O. (%)	Carbono (ton/ha)	Promedio (ton/ha)
B1	0-10	1,99	115,43	
	0-20	1,73	100,35	90,68
	20-30	0,97	56,26	
B2	0-10	2,6	150,81	
	0-20	1,74	100,93	95,32
	20-30	0,59	34,22	

**Parcela C: Sistema agroforestal**

Coordenadas : E: 391529 N: 8971233

Altitud : 837 msnm

Área : 500 m<sup>2</sup>

**Tabla 29.** Carbono en las hojarascas del sistema agroforestal en la parcela C

Muestra	Peso muestra (gr)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Carbono (t C/ha)	Promedio
C1	200	21,82	16,83	5,19	
C2	200	17,49	16,02	4,37	
C3	200	18,15	15,59	4,66	4,93
C4	200	30,35	24,11	5,04	
C5	200	21,78	16,18	5,38	

**Tabla 30.** Carbono en las raíces del sistema agroforestal en la parcela C

Muestra	Profundidad (cm)	Peso fresco raíz (gr)	Peso seco raíz (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Carbono en raíces (ton/ha)
C1	0-10	84,78	0,043	4,729	2,364
	0-20	73,98	0,030	3,359	1,679
	20-30	21,87	0,016	1,739	0,869
C2	0-10	91,43	0,047	5,223	2,612
	0-20	68,72	0,034	3,804	1,902
	20-30	15,7	0,012	1,301	0,651

**Tabla 31.** Carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal en la parcela C

Muestra	Profundidad (cm)	M.O. (%)	Carbono (ton/ha)	Promedio (ton/ha)
C1	0-10	3,48	201,86	
	0-20	0,79	45,82	91,65
	20-30	0,47	27,26	
C2	0-10	2,1	121,81	
	0-20	0,9	52,20	66,71
	20-30	0,45	26,10	

**Parcela D: Sistema agroforestal**

Coordenadas : E: 391529 N: 8971233  
 Altitud : 837 msnm  
 Área : 500 m<sup>2</sup>

**Tabla 32.** Carbono en las hojarascas del sistema agroforestal en la parcela D

Muestra	Peso muestra (gr)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Carbono (t C/ha)	Promedio
D1	200	18,92	16,99	4,45	
D2	200	19,79	16,36	4,84	
D3	200	24,84	18,74	5,30	5,19
D4	200	26,04	17,5	5,95	
D5	200	21,78	16,18	5,38	

**Tabla 33.** Carbono en las raíces del sistema agroforestal en la parcela D

Muestra	Profundidad (cm)	Peso fresco raíz (gr)	Peso seco raíz (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Carbono en raíces (ton/ha)
D1	0-10	102,56	0,045	4,961	2,481
	0-20	80,32	0,036	3,986	1,993
	20-30	30,23	0,011	1,183	0,592
D2	0-10	82,18	0,039	4,381	2,191
	0-20	61,37	0,026	2,937	1,468
	20-30	22,63	0,015	1,704	0,852

**Tabla 34.** Carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal en la parcela D

Muestra	Profundidad (cm)	M.O. (%)	Carbono (ton/ha)	Promedio (ton/ha)
D1	0-10	1,42	82,37	
	0-20	1,21	70,19	57,04
	20-30	0,32	18,56	
D2	0-10	1,84	106,73	
	0-20	1,01	58,58	65,55
	20-30	0,54	31,32	



# ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE:	YILCA ROSAS MABELITA	FECHA DE DEPÓSITO:	16/04/2025
PROVENIENCIA:	PUEBLO ALIANZA - SANTA ROSA DE ALTO YARAJANCA - MABANDY - HUANUCO	RESERVO N°:	70082
REFERENCIA:	FUNDO YILCA - CAFE - 8 AÑOS	IDENTIFICADO POR:	EL SOLICITANTE

**RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO**

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO										ANÁLISIS QUÍMICO												
			Cosecha	MUF	%	%	%	Ciclo Fecund	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K <sub>2</sub> O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICs	Sulfuro Cambiable	Azufre Cambiable	Sulfuro de Aluminio
			CAMBIALES (mg(-)/kg)																						
%																									
1	S24-0129	BP S1	86	18	17	Prinero Arancas	0,18	4,22	0,87	0,033	9,934	26,332	---	1,236	0,887	0,079	0,042	1,750	0,680	4,838	48,218	81,788	37,796		
2	S24-0130	SAP S1	80	20	21	Prinero Arancas	0,18	4,14	0,82	0,041	8,548	26,748	---	1,002	0,833	0,034	0,041	1,270	0,330	3,408	50,188	48,878	40,188		
3	S24-0131	BP S2	86	14	21	Prinero Arancas	0,28	4,30	1,13	0,888	12,787	33,823	---	0,528	0,874	0,060	0,039	1,620	0,280	2,990	29,809	60,191	60,836		
4	S24-0132	SAP S2	84	20	27	Prinero Arancas	0,04	4,26	0,83	0,048	8,328	29,427	---	0,880	0,681	0,043	0,830	1,720	0,480	3,602	28,833	81,887	47,791		

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras analizadas. Puede producirse la contaminación con el polvo de esta oficina en la elaboración de los resultados.  
 Los Resultados no pueden ser usados como una declaración de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María

  
 Dr. JORGE JUANES HUAYANAY YUPANQUI  
 Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



**Figura 21.** Análisis de laboratorio general de suelo

**Anexo D:** Panel fotográfico**Apéndice A.** Tipo de vegetación**Figura 22.** Bosque intervenido**Figura 23.** Sistema agroforestal

## Apéndice B. Toma de muestra



**Figura 24.** Delimitación de la parcela en el bosque intervenido



**Figura 25.** Toma de muestra de suelo



**Figura 26.** Medición de la profundidad para la roma de muestra



**Figura 27.** Toma de muestra de hojarasca

## Apéndice C. Análisis en laboratorio



**Figura 28.** Pesaje de las muestras de hojarascas



**Figura 29.** Muestras de hojarascas en el horno



**Figura 30.** Separación de las raíces del suelo



**Figura 31.** Muestras de raíces en el horno