

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



**“CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN
Theobroma cacao (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIAGRÁFICAS EN
EL DISTRITO LUYANDO- HUÁNUCO”**

Tesis
para optar el título de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA MENCIÓN
GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTADO POR
JOSE LUIS HUAYNATES NATIVIDAD

Tingo María - Perú
2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO
DIRECCIÓN



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 001-2026-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 08:00 a.m. del martes 23 de diciembre de 2025, reunidos de manera presencial en el Auditorio del segundo nivel de la Escuela de Posgrado, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

“CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN *Theobroma cacao* (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIOGRAFICAS EN EL DISTRITO LUYAMDO - HUÁNUCO”

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental HUAYNATES NATIVIDAD, JOSE LUIS

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO** Acto seguido, a horas **09:15 a.m** el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.


.....
Dr. NELINO FLORIDA ROFNER
Presidente del Jurado


.....
DR. LADISLAO RUIZ RENGIFO
Miembro del Jurado


.....
DR. LUIS EDUARDO ORE CIERTO
Miembro del Jurado


.....
Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
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 115 - 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:

Maestría en Ciencias en Agroecología Mención: Gestión Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN <i>Theobroma cacao</i> (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIAGRÁFICAS EN EL DISTRITO LUYANDO - HUÁNUCO	JOSE LUIS HUAYNATES NATIVIDAD	09 % Nueve	0 % Cero

Tingo María, 08 de abril de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA MENCIÓN
GESTIÓN AMBIENTAL



PROYECTO DE TESIS

“CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN *Theobroma cacao* (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIOGRAFICAS EN EL DISTRITO LUYANDO- HUÁNUCO”

Área de investigación	: Gestión ambiental - PICSDS
Grupo de investigación	: Gestión ambiental
Línea de Investigación	: Gestión de la contaminación.
Autor	: Ing. Jose Luis HUAYNATES NATIVIDAD
Asesor	: Dr. Jose Dolores LÉVANO CRISÓSTOMO.
Lugar de ejecución	: Sector Naranjillo, Santa Rosa y Marona – Distrito de Luyando
Duración	: 07 meses
Financiamiento	: 7 725,85 soles
FEDU	: NO
Propio	: SI
Otros	: NO

Tingo María – Perú, 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María **VICERRECTORADO DE**
INVESTIGACION DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA
INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

" año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo"

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Recursos Naturales Renovables
Escuela Profesional/ Departamento Académico	: Escuela profesional de Ingeniería en conservación de suelos y agua
Título de la Tesis	: CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN <i>Theobroma cacao</i> (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIAGRÁFICAS EN EL DISTRITO LUYANDO- HUANUCO
Autor de la Tesis	: Ing. José Luis HUAYNATES NATIVIDAD
DNI	:43096729
Correo Electrónico	: jose.huaynates@gmail.com
Asesor	: Dr. José Dolores LÉVANO CRISÓSTOMO.
Área de Investigación	: Gestión ambiental - PICSDS.
Grupo de Investigación	: Gestión ambiental.
Línea de investigación	: Gestión de la contaminación.
Lugar de Ejecución	: Sector Naranjillo, Santa Rosa y Marona – Distrito de Luyando
Fecha Inicio	: Marzo 2024
Fecha Termino	: Setiembre 2024
Presupuesto	: S/.7 725,85 soles
Financiamiento	: Propio (x) FEDU () Externo ()

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCION GESTIÓN AMBIENTAL



**“CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN
Theobroma cacao (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIOGRAFICAS EN
EL DISTRITO LUYANDO- HUÁNUCO”**

Autor	: Ing. Jose Luis HUAYNATES NATIVIDAD
Asesor	: Dr. Jose Dolores LÉVANO CRISÓSTOMO
Programa de investigación	: Ciencias básicas
Línea de investigación	: Física y química de suelos
Eje temático	: Almacenamiento de carbono en ecosistemas
Lugar de ejecución	: Tingo María
Duración	: 08 meses
Financiamiento	: Propio

Tingo María – Perú, 2025

DEDICATORIA

A Dios:

Divino creador de todo lo que existe,
quien me dio la vida y me dotó de
inteligencia para poder
conseguir
uno de mis mayores anhelos.

A mi madre:

Seres a quien debo la vida, por su cariño y
Aprecio. Susana natividad Bardales, mi
más profundo agradecimiento y eterna
gratitud por sus consejos y esfuerzo para la
culminación de mi carrera
profesional.

A mis queridos hijos: Cristhiano y
Valeria, por ser mi motivación
para la culminación de la
presente investigación.

A los docentes:

Por la enseñanza que nos brindan y el
ejemplo que representan para nuestra
formación como profesionales.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, que a través de la Escuela de posgrado ha permitido cristalizar uno de mis anhelos profesionales.
- A los catedráticos de la escuela de posgrado – UNAS, por su contribución en mi formación académica.
- A los miembros del jurado de tesis: Dr. NELINO FLORIDA ROFNER, presidente, Dr. LADISLAO RUIZ RENGIFO e Ing. M. Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO miembros del jurado, por sus invalorable aportes y revisión del presente trabajo de investigación.
- Al Dr. José Dolores LÉVANO CRISÓSTOMO, asesor de la presente investigación, por su apoyo incondicional en el proyecto, ejecución y culminación.
- Al Ing. Erick C. ROMERO CARRION, por el apoyo incondicional del presente trabajo de investigación hasta su publicación.
- Al Economista ENRIQUE PEZO, que me asesoró con la metodología de investigación según sugiere la normativa del Reglamento de Tesis de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	Objetivo general.....	14
1.2.	Objetivos específicos	14
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1.	Theobroma cacao (cacao)	15
2.2.	Sistemas Agroforestales (SAF).....	17
2.3.	Potencialidades y beneficios de los Sistemas Agroforestales (SAF)	18
2.4.	Biomasa aérea de Sistemas Agroforestales (SAF).....	19
2.5.	Deposición de hojarasca en Sistemas Agroforestales (SAF).....	20
2.6.	Carbono	20
2.6.1.	Problemática de la emisión de carbono	21
2.6.2.	Origen del carbono en el suelo.....	22
2.6.3.	Formas y fracciones de carbono en el suelo	23
2.6.4.	Fuentes y depósitos de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierra	24
2.7.	Carbono en el suelo de Sistemas Agroforestales (SAF).....	25
2.8.	Métodos para estimar o cuantificar la cantidad de carbono.....	25
2.9.	Reportes del trabajo de investigación	26
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1.	Lugar de ejecución.....	30
3.1.1.	Datos climáticos geológicos y suelos	30
3.2.	Material y métodos	31
3.2.1.	Materiales y equipos	31
3.3.	Metodología	32
3.3.1.	Selección, delimitación y croquis del área en estudio	35
3.4.	Parámetros por evaluar de acuerdo con los objetivos.....	36
3.4.1.	Carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas.....	36
3.4.2.	Carbono almacenado de cacao CCN-51 frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en tres unidades fisiográficas	36
3.4.3.	Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades	
	40	
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1.	Contenido de carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas	42

4.2.	Carbono almacenado de cacao frente las especies arbóreas, herbáceas y hojarasca en tres unidades fisiográficas	46
4.3.	Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades fisiográficas	52
V.	CONCLUSIONES	60
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	61
VII.	REFERENCIAS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Datos de la ubicación geográfica de las tres unidades fisiográficas en Luyando	30
2. Componentes de estudio	34
3. Matriz de operacionalización.....	36
4. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas.....	42
5. Prueba de T para la variable contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas (t/ha).	42
6. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono por componente vegetal en tres unidades fisiográficas de Luyando.	45
7. Prueba de T y de Wilcoxon para el valor de carbono en los componentes vegetales en tres unidades fisiográficas en Luyando.	47
8. Carbono almacenado (t/ha) en los diferentes componentes del sistema agroforestal.....	49
9. Prueba T para muestras independientes en las variables del suelo.	53
10. Total de carbono almacenado por unidad fisiográfica.	55
11. Cuantificación de lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades fisiográficas a diferentes profundidades.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Ciclo de carbono en la tierra.....	23
Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza alta (Ta), Terraza baja (Tb) y Colina baja (Cb).....	31
Detalle de la parcela con sus ocho transectos internos.....	36
Cuadrantes de 1 m x 1 m para material herbáceo, arbustivo y cuadrantes interiores.....	38
Diagrama de caja de carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas...44	44
Diagrama de caja de variables correspondientes al suelo de tres unidades fisiográficas.	52
Toma de medida de la circunferencia del tallo de cacao.....	76
Medición de la circunferencia (altura de pecho) en especies forestales.....	76
Evaluación de plantas herbáceas del agroecosistema del cacao.....	77
Evaluación de hojarasca del agroecosistema del cacao.....	77
Apertura de calicata en los transectos para el muestreo de suelo.....	78
Evaluación del color del suelo desde 0 cm a 30 cm de profundidad.....	78
Evaluación del número de lombrices/unidad de muestreo.....	79
Evaluación de la densidad del suelo de las unidades fisiográficas.....	79
Toma de datos mediante identificación de los SAF.....	80
Avistamiento del complejo ecosistémico del cultivo de cacao con su entorno.....	80
Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza alta (Ta), Terraza baja (Tb) y Colina baja (Cb).....	81

RESUMEN

El estudio evaluó el contenido de carbono en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao*, en tres unidades fisiográficas del distrito Luyando-Huánuco: Terraza baja, Terraza alta y Colina baja. La investigación se realizó en el caserío de Marona, utilizando el método alométrico recomendado por Arévalo et al. (2002) y la metodología de EMBRAPA para estimar el carbono de la biomasa vegetal, considerando biomasa aérea viva, arbustiva y herbácea seca. Los resultados mostraron que el cacao variedad CCN-51 almacenó 80,16 t/ha de carbono en la terraza baja, 75,12 t/ha en la terraza alta y 47,65 t/ha en la colina baja. En términos porcentuales, en la terraza baja, el cacao almacenó el 34,93% del carbono total del sistema agroforestal (229,48 t/ha), mientras que en la colina baja, almacenó el 58,31% del carbono total (81,72 t/ha). Además, se identificó que las especies arbóreas en la Terraza baja presentaron mejores condiciones relacionadas con el carbono del suelo, la densidad aparente y el peso del volumen del suelo. Esto se atribuye a que los árboles en esta zona son de mayor edad y diámetro, generando una mayor biomasa y, por tanto, un mayor almacenamiento de carbono. Este estudio destaca la variabilidad del almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao según la unidad fisiográfica, subrayando la importancia de la estructura arbórea para la captura de carbono en estos ecosistemas.

PALABRA CLAVE: Sistemas agroforestales, Carbono almacenado, *Theobroma cacao*, Unidades fisiográficas

ABSTRACT

The study evaluated the carbon content in agroforestry systems of *Theobroma cacao* in three physiographic units of the Luyando-Huánuco district: low non-flooded terrace, high terrace, and low hill. The research was conducted in the village of Marona, using the allometric method recommended by Arévalo et al. (2002) and the EMBRAPA methodology to estimate the carbon in plant biomass, considering living aerial biomass, shrubs, and dry herbaceous biomass. The results showed that the CCN-51 cocoa variety stored 80.16 t/ha of carbon on the low terrace, 75.12 t/ha on the high terrace, and 47.65 t/ha on the low hill. In percentage terms, on the lower terrace, cocoa stored 34.93% of the total carbon in the agroforestry system (229.48 t/ha), while on the lower hill, it stored 58.31% of the total carbon (81.72 t/ha). In addition, it was found that tree species on the non-flooded lower terrace had better conditions related to soil carbon, bulk density, and soil volume weight. This is attributed to the fact that the trees in this area are older and larger in diameter, generating greater biomass and, therefore, greater carbon storage. This study highlights the variability of carbon storage in cocoa agroforestry systems according to physiographic unit, underscoring the importance of tree structure for carbon sequestration in these ecosystems.

KEYWORDS: Agroforestry systems, Stored carbon, *Theobroma cacao*, Physiographic units

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, el cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales a nivel global, impulsado principalmente por el aumento significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono (CO₂), producto de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, deforestación y cambios en el uso de la tierra. La transformación de las zonas forestales en pastos o monocultivos agrícolas, mediante la quema de biomasa, contribuye con alrededor del 25 % de las emisiones anuales de carbono del planeta (IPCC, 2000).

En el distrito de Luyando, Huánuco, la actividad agropecuaria y los sistemas de producción agrícola tradicional generan impactos que contribuyen a la emisión de carbono a la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y sus consecuencias ambientales adversas. En este escenario, los sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* (SAF) emergen como una alternativa sostenible, al ofrecer beneficios ambientales tales como el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y la mejora de las propiedades del suelo.

No obstante, los agricultores del caserío Marona, desconocen la capacidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) CCN-51 establecidos en tres unidades fisiográficas distintas (terraza baja, terraza alta y colina baja), realizando sus prácticas de manejo de manera tradicional y cultural sin considerar las diferencias edafoclimáticas ni el potencial de estos sistemas para mitigar el cambio climático mediante el secuestro de carbono en biomasa y suelo.

Es por ello, que se tiene como problema de investigación la siguiente pregunta ¿Es viable la cantidad de almacenamiento de carbono de sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* (cacao) de tres unidades fisiográficas?, en base a esta interrogante se propuso determinar qué cantidades de carbono almacenan los diferentes tipos de suelos con cacao en tres unidades fisiográficas (planicie y colina), planteando la investigación con miras al futuro, para el conocimiento del almacenamiento de carbono que ofrece cada uno de ellos.

Asimismo, la realización de esta investigación es esencial porque permitirá aportar datos científicos sobre el potencial de los sistemas agroforestales con cacao para secuestrar carbono en el caserío de Marona, contribuyendo a la mitigación de los efectos negativos del cambio climático. Además, esta información puede servir de base para el diseño de políticas públicas locales y nacionales que incentiven la adopción de prácticas agroforestales, favoreciendo el desarrollo sostenible, la conservación de los recursos naturales y la mejora de la calidad de vida de los productores agrícolas en la zona.

Finalmente, los resultados obtenidos beneficiarán principalmente a los agricultores y pobladores del distrito de Luyando incluyendo al caserío Marona interesados en implementar sistemas de producción sostenibles basados en SAF con cacao aromático. Asimismo, serán de utilidad para autoridades ambientales, instituciones de investigación y organismos financiadores que apoyan proyectos relacionados con la conservación ambiental y el manejo sostenible de tierras agrícolas. Esto permitirá promover incentivos y subsidios para la adopción de prácticas que aumenten la captura de carbono y contribuyan a la mitigación del cambio climático en la región y el país.

1.1. Objetivo general

- Evaluar el contenido de carbono de sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* (cacao) de tres unidades fisiográficas en el distrito Luyando- Huánuco.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el contenido de carbono almacenado en el cultivo de cacao variedad CCN-51 bajo sistemas agroforestales de tres unidades fisiográficas diferentes.
- Determinar el almacenamiento de carbono de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao en unidades fisiográficas diferentes.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. *Theobroma cacao* (cacao)

El cultivo de cacao viene buscando una alternativa para uno de sus principales desafíos: “la baja rentabilidad de las áreas de cacao”. Entre las alternativas visualizadas por los productores de cacao para superar este desafío es, acertadamente la producción de cacao. Cabe resaltar que la denominación de cacao CCN-51 ofrece mayor productividad, resistencia a enfermedades (monilia); es decir, es un cacao sin imperfecciones en su aroma que a la vez proporciona un perfil aromático sofisticado. De esta manera *el cacao CCN-51 se puede definir como un cacao que tiene aromas especiales* (Santos et al., 2019).

¿Qué es el cacao CCN-51?

Según Santos (2009), tres organizaciones están directamente interesadas en el concepto de cacao CCN-51 y lo definen de la siguiente manera:

Organización Internacional del Cacao (ICCO): El cacao CCN-51 es el cacao procedente de la variedad Criollo, Trinitario o “Nacional” originario de Ecuador y producidas en países seleccionados por un comité especializado. Este comité reevalúa periódicamente la lista de los países productores.

Industrias: Cacao CCN-51 es cacao que tiene aromas originales: ya sea notas (aromas)

frutales, florales, de madera, de caramelo, etc., ya sea por un aroma de cacao pronunciado y delicado.

Investigadores: Es un cacao que tiene un aroma constitucional (presente en almendras frescas) y/o aroma de fermentación, que aparece tras la fermentación.

Analizando detenidamente las tres definiciones, se puede constatar que son idénticas, ya que utilizan la palabra Aroma como palabra clave. Así, sintetizando el cacao fino se puede definir como un cacao que tiene aromas especiales.

Cuando ICCO incluye la palabra “variedades” en la definición de cacao CCN-51 es porque existe una especie de consenso de que los cacaos: Criollos, Trinitarios y el “Nacional” de Ecuador son “aromáticos”. Según Barel (2005), el Criollo es un cacao fino y excelente aroma, pero el árbol es extremadamente frágil y poco productivo. El Trinitario es un híbrido entre el Forastero y el Criollo que puede tener características más cercanas de uno o de otro, sin embargo, la investigación en las naciones productoras de cacao fino intenta seleccionar a los Trinitarios que tengan las características aromáticas de los Criollos y la productividad de los Forasteros. Sin embargo, hay Trinitarios que no están clasificados como cacao fino, porque no tienen buenas características aromáticas, es el caso, por ejemplo, de los Trinitarios de República

de Camerún. Por otro lado, está el cacao Forastero que tiene aromas especiales y se clasifican como finos, es el caso del cacao “ameloned” de Santo Tomé; de los Forasteros de Uganda, en África y Vanuatu, una isla al sur del Pacífico. Entonces queda claro que “la variedad no es un criterio definitivo” para distinguir el cacao fino del no fino.

¿Cómo distinguir el cacao CCN-51?

Según Barel (2009), para distinguir el cacao CCN-51 de otros cacaos (bulk) se utilizan parámetros genéticos/geográfico; químicos; y organolépticos:

Parámetros genético-geográficos: ICCO se basa en el origen genético del árbol del cacao y define que las almendras de origen criollo, trinitario y del Ecuador, que se encuentran en regiones preseleccionadas se consideran finos.

Parámetros químicos: Evaluaciones organolépticas asociadas a la relación teobromina/cafeína se ha identificado como un criterio consistente para separar el cacao fino del cacao no fino.

Parámetros organolépticos: Este es el criterio principal y también el criterio que adopta la industria a la hora de comprar. Las principales características que distinguen el cacao fino y no fino son esencialmente organolépticas, es decir, es “el aroma y sabor”. Estas son exactamente las características (aroma y sabor) que la industria busca chocolate fino y por eso paga precios más altos. Así, el Cacao CCN-51 se destaca por presentar aromas y sabores especiales que no se encuentran en el cacao básico (bulk), sin embargo, en su elaboración, todos los criterios utilizados en el análisis del cacao a bulk, pero se pone especial énfasis a los parámetros organolépticos.

Ante lo manifestado en función a las características organolépticas (aroma y sabor) el cacao bulk es un cacao no aromático, teniendo otros parámetros de análisis de calidad que son específicamente físicos, y corresponde a un cacao padrón. África, Asia y América latina (Brasil) son los mayores productores de este tipo de cacao (Amores et al., 2007).

Según Barel (2005), el Cacao CCN-51. También se le conoce como cacao “flavor”. Se destaca por presentar aromas y sabores especiales y en pruebas de calidad se tienen en cuenta todos los criterios utilizados en el análisis del cacao “bulk”, sin embargo, se pone especial énfasis en los parámetros organolépticos. Así, el comercio internacional clasifica a los países productores de cacao en dos grupos: Países productores de cacao bulk y los productores de cacao fino. El mercado de cacao considera que existe siete orígenes principales de cacao finos, que serían: Ecuador, Venezuela, Caribas, el archipiélago de San tomé, Madagascar, Isla de Java, Papua nueva guinea. En el año 2008 la ICCO, el Perú fue incluido en la lista de los países productores de cacao fino o aromáticos, en la cual es caracterizado por

aromas con notas de miel, caramelo, nueces dulces, hasta a veces hasta a las mismas flores (ICCO, 2008).

2.2. Sistemas Agroforestales (SAF)

En general, los SAF se caracterizan por “uso de árboles más cualquier otro cultivo, o por la combinación de árboles con cultivos alimentarios” (Vergara, 1985). Una definición clásica es la que describe a los SAF como sistemas en los que se mezclan, simultáneamente, en la misma área, especies de árboles perennes con cultivos agrícolas anuales, y/o animales, para conseguir una producción permanentemente mayor (International Centre For Research In Agroforestry [ICRAF], 1983).

Las definiciones más amplias de SAF hacen referencia a los beneficios sociales y ambientales, que surgen de las interacciones ecológicas más complejas de estos sistemas y de la variedad de productos y servicios proporcionados por estos sistemas (Nair et al., 2008). La Asociación de Agroforestería de Clima Templado, AFTA (acrónimo en inglés), define al SAF como un “sistema de manejo intensivo de la tierra donde la gestión es hecho para optimizar los beneficios de las interacciones ecológicas donde arbustos y/o árboles se mezclan con cultivares agrícolas y/o ganadería”.

Para Götsch (1995), sistemas compuestos por dos especies o por varios, incluidas plantas no deseadas y plantas sin valor comercial, pudieran ser considerados como SAF. Fischer y Vasseur (2002) también mencionan que el SAF incluye cercas vivas o algunos árboles en áreas de pasto, formando sistemas silvopastoriles. En general, la modalidad SAF más conocida son los sistemas multiestratos, compuestos por estratos vegetales superpuestos, con el fin de optimizar el uso de recursos como iluminación, humedad y nutrientes (Rao et al., 1998).

En países de América de sur que poseen la Amazonia, las SAF están siendo ampliamente difundidos y han comenzado a ser estudiados más en los últimos años, con énfasis en agricultura familiar, ya que estos sistemas de producción permiten recuperar áreas degradados, la producción de cultivos diversificados (alimentos y biocombustibles) y la generación de servicios ambientales (infiltración de agua, acumulación de materia orgánica, mantenimiento de la biodiversidad). Además, constituyen importantes sistemas de Fijación de C en biomasa vegetal y suelo (Kato et al., 2006).

La materia orgánica del suelo resulta, en gran parte, de la descomposición de residuos de origen animal y, principalmente, vegetal, por lo que no tienen relación con el material de origen del suelo (Santos y Gamargo, 1999), asimismo los autores mencionan que estos residuos sufren descomposición inicialmente parcial por mesofauna y, posteriormente,

por microbiota en descomposición y parte del carbono de los residuos se libera para la atmósfera como CO₂ y el resto pasa a formar parte de materia orgánica como un componente del suelo

2.3. Potencialidades y beneficios de los Sistemas Agroforestales (SAF)

De manera general, se pudiera vincular a la parte ambiental en la cual los beneficios pueden definirse como aquellos que están destinados a prevenir y reducir los daños ambientales a nuestros recursos, así como los problemas concernientes con los residuos, la contaminación y los daños ecosistemas (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico [OCDE], 2005).

Sistemas de producción sostenibles que contribuyan a la conservación de los recursos naturales son potencialmente proveedores de servicios ambientales, destacándose los SAF, que han sido recomendados para las regiones tropicales, debido a los beneficios ambientales, sociales y económicos asociados con estos sistemas (Gama-Rodrigues et al., 2006). Según Osterrooht (2002), entre los diferentes sistemas de manejo, los SAF son aquellos que acumulan el mayor volumen de biomasa aérea, debido, en parte, al componente arbóreo, que forma un sistema de raíces más desarrollado y crea estratos vegetales más diferenciados que los cultivos anuales.

Los SAF son a menudo reconocidos como una de las formas más apropiadas de eliminar carbono de la atmósfera e incorporarlo en la biomasa de las plantas, junto con el manejo de bosques secundarios, y surgen como alternativas viables desde el punto de vista ambiental y económico, capaces de contribuir en la absorción de CO₂ y minimiza el efecto invernadero (Smith et al., 1998). Los beneficios ambientales generados por los SAF generalmente están relacionados con la capacidad de retención de carbono de la atmósfera, ciclos adecuados de agua y nutrientes, y mejora de la calidad del suelo en comparación con los monocultivos agrícolas anuales o perennes (Luizão et al., 2006).

Debido a la diversidad de SAF existentes, Woda (2009) cuestionó si todas las modalidades de estos sistemas brindan servicios ambientales y, en el caso de respuesta positiva, en qué medida esto ocurre. En las regiones tropicales, la dinámica del crecimiento de las especies es más acelerado, lo que resulta en mayores tasas de secuestro de carbono, en comparación con las regiones templadas, según Nair y Nair (2003). Evaluar los SAF en materia de prestación ambiental, son necesarios indicadores que sean fáciles de aplicar y comprender, rápidos y baratos para su aplicación y que estén claramente definidas, para obtener resultados objetivos y comparables (Woda, 2009).

Kalacska et al. (2004) sugirieron que la capacidad de secuestro de carbono y la prestación de otros beneficios ambientales en los SAF está asociada con la complejidad de los

agroecosistemas, que puede estimarse mediante el Índice de Complejidad de Holdridge (ICH), un indicador que combina la riqueza de especies con la estructura y fisonomía de los sistemas, utilizando variables como altura, área basal, densidad arbórea y riqueza de especies. Al evaluar el secuestro de carbono, se debe tener en consideración el ciclo del carbono en los SAF y sus reservorios como suelo, raíces, biomasa aérea y aportes de carbono al sistema (vía caída de hojarasca) y también la cobertura del suelo y hojarasca (Palm et al., 2004).

Para Dixon (1995), la acumulación de biomasa en los SAF está relacionada con el manejo utilizado, composición de especies y región donde ocurre. El uso de prácticas de manejo agroforestal y prácticas de conservación de preparación del suelo potencialmente puede mitigar y reducir las emisiones de carbono, es decir secuestrarlo, captarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa y/o en el terreno. El proceso de secuestrar y almacenar carbono está influenciado por las tasas de fotosíntesis y descomposición de la materia orgánica.

2.4. Biomasa aérea de Sistemas Agroforestales (SAF)

Según Ketterings et al. (2001) la estimación de la biomasa encima del suelo es esencial para los estudios del balance global de carbono. Sin embargo, en el caso de sistemas agroforestales, Nair et al. (2009) destacaron la dificultad para encontrar métodos rigurosos para estimar la biomasa encima del suelo. La biomasa aérea se puede calcular mediante métodos directos e indirectos (Higuchi et al., 1998).

El método directo se basa en la estimación mediante muestreo destructivo, el que consiste en el desmontaje de individuos para pesar la parte aérea y posterior determinación de de carbono en biomasa. Este método, es más preciso y efectivo, pero generalmente es inviable pesar todos los árboles en un área y, por tanto, los trabajos que utilizan el método directo se basan en pocos y parcelas pequeñas (Hairiah et al, 2001).

El método indirecto es más rápido y no requiere corte, pesaje ni secado de ningún individuo. Permite muestrear una mayor superficie y mayor número de individuos, ya que utiliza variables que se obtienen más fácilmente en el campo, como el diámetro 1,30 m sobre altura total (h) y el suelo (diámetro a la altura del pecho) y Sin embargo, este método está sujeto a errores de medición de campo, que no siempre son se mencionan en trabajos que utilizan este método (Higuchi et al., 1998), principalmente en el SAF, que, al tener varias especies con diferentes hábitos, dificultan las generalizaciones de métodos indirectos, lo que puede implicar errores en estimación de la biomasa aérea (Nair et al., 2009).

Algunos estudios (Albrecht y Kandji, 2003; ICRAF, 2004; Montagnini y Nair, 2004) han sido efectuados con la finalidad de evaluar el carbono fijado en el SAF; sin embargo,

estos se basan exclusivamente en métodos “destructivos”, que requieren muestras de plantas “in situ” y evaluaciones de laboratorio, con alta relación costo-beneficio.

2.5. Deposición de hojarasca en Sistemas Agroforestales (SAF)

La hojarasca representa la reserva central de elementos minerales y orgánicos en ecosistemas de bosques tropicales, donde los suelos, en general, son químicamente pobres, y su descomposición permite que los elementos liberados de la biomasa vegetal retornen al sistema (Martius et al., 2004). Además, es el medio más importante transferencia de elementos esenciales de las plantas al suelo, asegurando disposición de nutrientes para el desarrollo del bosque (Vital et al. 2004). La importancia de evaluar la producción de hojarasca radica en comprender los reservorios y flujos de nutrientes en los ecosistemas, que constituyen la principal vía de aporte de nutrientes, a través de la mineralización de restos vegetales, desempeñando un importante papel para la formación y/o mantenimiento de fertilidad en el suelo, así como el suministro orgánico para flora y fauna local (Souza y Davide, 2001), ya una vez depositada en el suelo, la hojarasca lo protege contra la erosión, además de convertirse en una fuente potencial de energía para las especies consumidoras del ecosistema, al participar en el ciclo de nutrientes (Oliveira, 1997).

De esta manera, además de representar un eslabón fundamental en el flujo de energía y materia entre el ambiente físico y biótico, la hojarasca producida por la vegetación proporciona al ecosistema del cual hace parte una mayor estabilidad, variando según con su etapa sucesión (Oliveira, 1997). En ecosistemas tropicales con componentes arbóreos, como los SAF, existe una producción continua de hojarasca durante todo el año (Werneck et al. 2001), cuya cantidad producida en otros momentos dependerá del manejo (Leitão-Filho et al., 1993). La gran cantidad de especies pioneras encontradas en bosques en la etapa inicial de sucesión ecológica y en SAF multiestratificados, es preponderante para la mayor producción de hojarasca (Leitão-Filho et al. 1993; Oliveira, 1997). Sin embargo, aunque las especies pioneras presentan altos estándares de productividad, la abundancia de estas especies no parece constituir el principal factor determinante de las altas tasas de productividad, pudiendo ser menos importantes que el tamaño y porte de la vegetación en la determinación de la producción total de hojarasca (Songwe et al., 1988). Además, la cantidad de hojarasca depositados también pueden variar dentro de un mismo tipo de vegetación, dependiendo del grado de perturbación y manejo utilizado en las áreas (Martins y Rodrigues, 1999).

2.6. Carbono

Es esencial para la vida en el planeta, ya que este elemento forma parte de la estructura de todas las moléculas orgánicas y participa en diversas actividades metabólicas. Es

el elemento más abundante en la naturaleza, está presente en el 99,9 % de los seres vivos químicos, se encuentra de distintas formas (sólido, líquido y gaseoso). Los cuatro compartimentos principales de carbono en la Tierra son: los océanos, la atmósfera, las formaciones geológicas que contienen carbono fósil y mineral y los ecosistemas terrestres (biota + suelo) (Machado, 2005), constituyendo un ciclo con muchas reacciones involucradas.

2.6.1. Problemática de la emisión de carbono

2.6.1.1. Dióxido de carbono

Según United Nations Environment Programme (UNEP, 1992) suscribe que el CO₂ en estado gaseoso se compone de la unión de dos elementos: oxígeno y carbono. Su formación se da a través de la quema de carbón o compuestos hidrocarburos, el proceso de fermentación de materia orgánica, así como la respiración tanto de humanos como de animales. En la atmósfera, se presenta en concentraciones mínimas y las plantas lo absorben, generando oxígeno a cambio. Este gas tiene un leve olor que puede causar irritación, no tiene color y es más denso que el aire.

2.6.1.2. Efecto invernadero

Centeno (1992) destaca el papel crucial del vapor de agua y el CO₂ para permitir la vida en la Tierra al atrapar el calor solar y mantener una temperatura adecuada. Sin estos gases, la temperatura promedio caería en picado a -18 °C. El efecto invernadero permite que la radiación solar de onda corta caliente la superficie mientras absorbe la radiación infrarroja saliente, manteniendo la temperatura alrededor de los 15 °C.

Houghton y Woodwell (1989) aclaran que el efecto invernadero natural no es dañino. La preocupación actual proviene de las actividades humanas (deforestación, combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, etc.) que incrementaron la concentración de CO₂ y otros gases, atrapando más energía solar y elevando la temperatura promedio del planeta.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 1997) identifica los principales gases generados por el hombre que contribuyen al efecto invernadero amplificado como CO₂, metano, monóxido de carbono, ozono troposférico, óxido de nitrógeno, clorofluorocarbonos, óxidos nitrosos y vapor de agua.

Según el IPCC (2004), el cambio climático provoca transformaciones en el entorno físico y biológico, con impactos adversos en la composición, resiliencia y productividad de los ecosistemas, así como en los sistemas socioeconómicos, la salud y el bienestar humano. Si las emisiones de gases de efecto invernadero se duplicaran

respecto a los niveles preindustriales de CO₂, la temperatura podría aumentar entre 1,5 y 3,5 °C.

2.6.2. Origen del carbono en el suelo

Se inicia cuando el carbono penetra en el suelo a través de la fotosíntesis de las plantas y la desgaste de M.O., tanto vegetal como animal. Parte de este carbono se convierte en humus y se queda en el suelo. Una parte regresa a la atmósfera debido a la actividad de microorganismos. Se trata de un equilibrio cambiante que se ve afectado por diversos factores, incluyendo las condiciones climáticas, la composición del suelo, su estructura y la manera en que se maneja. Un manejo adecuado de los suelos agrícolas facilita que el carbono se capture y se conserve a largo plazo, contribuyendo así a disminuir el nivel de CO₂ en la atmósfera.

Según Machado (2005), el compartimento de C es el que abunda en mayor cantidad en los sistemas ecológicos bien manejados o que no tengan una acción antrópica dañina (aproximadamente 4 veces el compartimento de C de la vegetación y 3,3 veces el de la atmósfera) y está compuesto de C orgánico y mineral. Según este autor, el C orgánico representa el equilibrio entre el añadido al suelo por la vegetación y el que se pierde en aguas profundas y, finalmente, en los océanos por lixiviación como C orgánico disuelto o en la atmósfera por actividad microbiana como CO₂.

El ciclo del C en el suelo es bastante complejo, porque, al mismo tiempo que degradan los carbohidratos complejos, los microorganismos sintetizan cuerpos del mismo tipo y sus otros constituyentes celulares, lo que dificulta la separación de los compuestos intermedios de degradación y los de síntesis (Puerto Rico, 2009). Mayores detalles referente al ciclo del carbono se visualiza en la Figura 1. Las transformaciones de C en el suelo comprenden dos fases distintas: la fase de fijación de C-CO₂ atmosférica; y la fase de regeneración, descritas a continuación:

- Fase de fijación. - según Pulrolnik (2009), es realizada por organismos fotosintéticos, donde se sintetizan compuestos de hidrocarburos como almidones, celulosas y hemicelulosas, ligninas, proteínas, ácidos nucleicos, entre otros. Según este autor, cuando regresan al suelo, son utilizados por organismos que regeneran C-CO₂, durante el proceso de oxidación respiratoria, utilizando esta energía para mantener el metabolismo.

- Fase de regeneración. - Esta fase, como cita Pulrolnik (2009), comprende las etapas de descomposición de sustancias carbonatadas a través de la acción del microbiota del suelo. Los microorganismos poseen un importante papel en este ciclo, ya que utilizan los residuos vegetales como fuentes de energía, además de obtener sustrato de carbono

para la síntesis de nuevas células, por tanto, el producto final producido por el microbiota del suelo es el CO₂, liberado a la atmósfera.

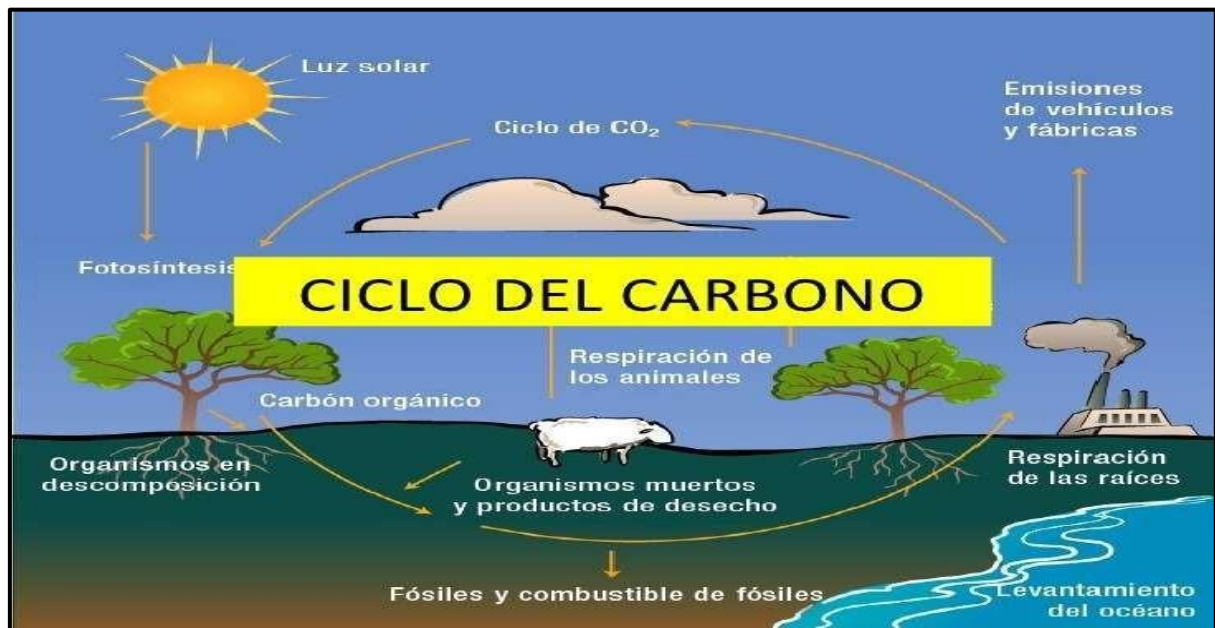


Figura 1. Ciclo de carbono en la tierra

Fuente: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/ciclo-del-carbono/>

2.6.3. Formas y fracciones de carbono en el suelo

La materia orgánica es crucial para la salud y el desarrollo del suelo, aunque su cantidad y calidad varían según el tipo de suelo y el clima, entre otros factores. En condiciones aeróbicas, gran parte del carbono entrante es lábil, con solo una pequeña fracción (1 %, o 0,4 Pg/año) del carbono que ingresa (55 Pg/año) quedando almacenada en la fracción húmica. La MOS, de composición compleja y heterogénea, generalmente se encuentra combinada o asociada con los minerales del suelo. Se han desarrollado diversos métodos de separación para identificar los componentes de la M.O., incluyendo grupos cinéticos definidos por su tasa de renovación del carbono (Cambardella, 1998).

El C es el principal constituyente de la materia orgánica y puede presentarse en diferentes formas en el suelo, las cuales pueden ser evaluadas y separadas mediante técnicas de fraccionamiento, ya sea químico o físico. A través de estas técnicas es posible separar las diferentes formas presentes en el suelo, según solubilidad y/o funcionalidad. El fraccionamiento químico consiste en separar el C presente en la MOS en tres fracciones que varían según su solubilidad, siendo las huminas, los ácidos fúlvicos y húmicos.

Para el carbono estable, es crucial distinguir entre protección física/química y captura. La protección física involucra el encerramiento de materia orgánica por arcillas o agregados del suelo (Puget et al., 1995). La protección química implica uniones

específicas con componentes del suelo, como coloides o arcillas, o con compuestos orgánicos duraderos. Sin embargo, la retención de carbono, según el Protocolo de Kyoto, ignora estas diferencias y equivale al almacenamiento de cualquier forma de carbono (Cambardella, 1998). Diversos factores afectan las categorías de materia orgánica del suelo. La M.O libre y la biomasa microbiana dependen de la cantidad y gestión de residuos, y del clima. La agregación, textura y mineralogía del suelo determinan la M.O en macroagregados, por lo que la labranza impacta su tamaño. Los reservorios restantes son menos sensibles a factores agronómicos y más a factores edáficos como la microagregación y la composición de la arcilla.

Los procedimientos de separación física, como la clasificación por tamaño de partículas, densidad o agregados, permiten separar fracciones cinéticas relevantes. Dentro de estas fracciones, la materia orgánica es muy reactiva a los cambios en el uso del suelo (Cambardella, 1998). La biomasa microbiana, que representa del 1 al 5 % de la materia orgánica total del suelo y es una fuente de nutrientes (nitrógeno y fósforo), puede medirse con técnicas directas. Esta fracción lábil fluctúa estacionalmente y responde rápidamente a los cambios en el manejo del suelo (Gregorich et al., 1996).

Los métodos isotópicos, como el C-14 y la proporción natural de C-13, son valiosas herramientas para estimar el tiempo de residencia de la M.O y sus fracciones en el suelo. La proporción de C-13 natural permite evaluar tasas de recambio en escalas de tiempo de años a siglos, mientras que el C-14 es útil para plazos de siglos a milenios. Estas técnicas se aplican tanto a muestras de suelo completas como a fracciones específicas. El método basado en la proporción de C-13 requiere un cambio previo en la vegetación entre tipos fotosintéticos C3 y C4. Según la FAO (1998), la principal ventaja de estos métodos es que permiten medir el recambio de la materia orgánica, deduciendo así el tiempo de residencia de diferentes compartimentos. Tras cambios significativos en la vegetación, se puede rastrear la evolución de distintos residuos vegetales. Los reservorios de C en el suelo presentan distintos tiempos medios de residencia, que varían desde años hasta milenios, dependiendo de su composición bioquímica, protección y uniones químicas. Por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa.

2.6.4. Fuentes y depósitos de carbono en los diferentes sistemas de uso de tierra

En diferentes sistemas de uso de tierra, el C es liberado por la vegetación después de su tala y quema y, en el suelo después de frecuentes intervenciones en la preparación del suelo. Esto provoca la alteración del estado estable del carbono en la biomasa,

el aumento de la tasa de mineralización de la M.O y, en consecuencia, la liberación de C que se encuentra en los poros del suelo.

Houghton y Woodwell (1989) calcularon que las emisiones resultantes de la conversión de tierras, como la deforestación y el aumento del pastoreo y la agricultura, sumaron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990, pasando de 0,4 Pg por año en 1850 a 1,7 Pg por año en 1990. Esto resultó en una liberación neta de 25 Pg de C a la atmósfera. Según el IPCC (2000), la reducción de tierras agrícolas ha sido de 50 Pg de carbono, lo que equivale a un tercio de la reducción total en suelos y vegetación.

La FAO (2002) indica que las reservas de C orgánico en suelos naturales son el resultado de un equilibrio activo entre la captura de materia vegetal muerta y la pérdida a través de procesos de descomposición (humificación y mineralización).

El uso de prácticas de manejo forestal, agroforestal y labranza conservacionistas de preparo del suelo pueden potencialmente mitigar y reducir las emisiones de C, es decir, secuestran, capturan y mantienen al C en mayor tiempo en el suelo, biomasa y los océanos. Mediante las prácticas forestales y agroforestales, el proceso se obtiene por la fotosíntesis y en el suelo, a través de la mineralización y descomposición de la M.O. (Dixon, 1995).

2.7. Carbono en el suelo de Sistemas Agroforestales (SAF)

La importancia del compartimento de carbono, en el suelo su ciclo global es fundamental, ya que este compartimento constituye el mayor reservorio de C terrestre, que comprende casi dos veces de cantidad de C en la atmósfera y en la biomasa vegetal (Swift, 2001) y, por lo tanto, cumple un rol crucial en secuestro de C (Stevenson, 1994).

El paso de áreas de vegetación natural en áreas de cultivo implica cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. A manera de ejemplo se menciona a los cambios en el manejo del suelo pudiendo acelerar la erosión y la pérdida de suelo por escorrentía, alterar el número de organismos, y a la vez interferir con la dinámica de MOS en sistemas de cultivo tradicionales, que pueden ser mitigados con la implementación del SAF (Trumbore et al., 1995). En los SAF, la inclusión de componentes arbóreos puede mantener o aumentar la productividad de una determinada área, debido a procesos que aumentan la entrada o reducen las pérdidas en el suelo, como M.O, nutrientes y agua, además de mejorar parámetros físico-químicas que benefician procesos de microbiología del suelo (Young, 1994).

2.8. Métodos para estimar o cuantificar la cantidad de carbono

El tema de la captura de carbono ha ganado importancia, por su influencia en el cambio climático, en base a esta polémica problemática, la necesidad de estudios específicos

de cálculos de captura de carbono por parte de los bosques. Generalmente los cálculos han sido basados en datos existentes sobre producción de biomasa y que no corresponden a las formaciones forestales de las diferentes regiones de zonas que tienen bosques que en especial serían los países que tiene a la Amazonia. En este sentido, existe una demanda de estudios de esta naturaleza, siendo necesario los que tengan aplicación metodológica para el cálculo del C en diferentes manejos, por lo cual debería tener el objetivo de abordar aspectos del potencial de secuestro de C por parte de los bosques, descripción de la metodología, recolección de datos y formas prácticas para la determinación de C.

Para Hernández (2001), hay dos metodologías que permiten calcular la biomasa, que serán descritos a continuación:

- Método destructivo. - utiliza datos recolectados a partir de las medidas destructivas de la vegetación en una unidad de superficie fijada. Debido al elevado costo que determina su ejecución no es recomendable su aplicación.

- Método alométrico. - estima el carbono total (C total) infiriéndolo a partir de la medición de una parte del individuo. Se basa en estimaciones de volumen de fuste y densidad de biomasa aérea arbórea (BA) forestal, aplicando ecuaciones alométricas de Brown y Lugo (1997) para bosques tropicales húmedos y muy húmedos premontanos. La biomasa aérea arbórea se calcula mediante ecuaciones de regresión alométrica aplicadas a árboles de una parcela medida. Este método es aplicable a bosques secundarios y maduros en climas secos y húmedos, aunque su uso es más apropiado en bosques densos, dado que los datos originales del modelo provienen de este tipo de bosques.

2.9. Reportes del trabajo de investigación

Ordoñez (1999) en su investigación titulada “Captura de carbono en un bosque templado” señala que la intervención humana en los bosques, cuyos espacios se están utilizando hoy en día para diferentes tipos de cultivos, hace relevante el análisis de los niveles de captura y retención de carbono en sistemas agroforestales dedicados a cultivos, permitiendo evaluar su eficacia y apreciar mejor su aporte no solo a la producción alimentaria, sino también como un factor importante en la reducción de carbono atmosférico, promoviendo así la conservación del medio ambiente. Concluye que uno de los cultivos que ha estado en aumento, sin duda, es la agricultura, cuya inclinación hacia las prácticas orgánicas motiva a los agricultores más que nunca a buscar una mayor consonancia con el entorno natural. Este hecho es beneficioso, ya que permite que desempeñen un papel más destacado en la captura y almacenamiento de carbono en la atmósfera.

Aristizabal et al. (2002), mediante su investigación “Estimación de la tasa de fijación promedio de carbono en el sistema agroforestal *Cordia alliodora* (nogal de café), *Teobroma cacao* (cacao) y *Musa paradisiaca* (plátano), a través del estudio de diferentes partes de la planta (Hojas, ramas, tronco o tallo y raíces) y en el suelo circundante”. Sembrando en una terraza alta, suelo profundo, ricos en M.O, bien aireados y drenados, de color negro a pardo muy oscuro en superficie y pardo amarillentos de textura franco arenoso. La fijación de carbono se determinó mediante la medición directa de la biomasa, a través del peso de los diferentes componentes vegetales. Se implementó un diseño experimental anidado para comparar edades, especies, componentes y estructura. En este diseño, cada tratamiento (estructura, componente, especie y edad) se anida jerárquicamente: las estructuras (hojas, troncos y raíz) se anidan en los componentes (biomasa aérea, subterránea, necromasa y suelo), los cuales se anidan en la especie (nogal, cafetero, cacao y plátano), y estas últimas, en las edades. El número de repeticiones correspondió al número de individuos muestreados por especie en cada parcela. El número total de individuos por parcela fue: cacao (60), nogal (15) y plátano (10), en una superficie de 500 m². Se trabajó con el cultivo de plátano, obteniendo una biomasa total de 30 kg/planta (sin incluir el racimo, que pesó 15 kg) a los 15 meses de siembra. En esta investigación no se cuantificó la fijación de carbono del plátano, ya que su corto ciclo de vida no permite un almacenamiento prolongado de carbono, lo que impide que se considere un sumidero de carbono. Los resultados obtenidos para el primer año indican una fijación de 5.5 t de carbono por ha, o 3.06 kg de carbono por planta.

En su investigación sobre el cálculo de biomasa y captura de carbono en sistemas agroforestales de café con sombra, Márquez (2005) verificó que el carbono acumulado por unidad de superficie varía significativamente según el tipo y estado del bosque. En bosques adultos siempre verdes, el carbono total fue de 606,80 MgC/ha, distribuido así: 283,75 MgC/ha en biomasa aérea, 79,92 MgC/ha en raíces (>5 mm), 2,79 MgC/ha en el sotobosque, 53,56 MgC/ha en la necromasa, 5,87 MgC/ha en la hojarasca y 180,91 MgC/ha en los primeros 30 cm de suelo. El carbono almacenado en los suelos superó los 140 MgC/ha (primeros 30 cm) en todos los casos, aunque se encontró M.O., hasta los 120 cm, sugiriendo cambios significativos más allá de los 30 cm. Márquez también indicó que los principales reservorios de carbono en los ecosistemas forestales son la vegetación, la hojarasca y el suelo.

En su tesis doctoral de 2015, Zavala (2015) no encontró diferencias significativas en la retención y almacenamiento de carbono del suelo entre sistemas agroforestales de diferentes edades y unidades fisiográficas en Tingo María. Sin embargo, el estudio indicó que los sistemas agroforestales de cacao menores de 8 años tuvieron la mayor reserva de carbono

del suelo (66,16 t C/ha), seguidos por los sistemas de 8 a 16 años (62,38 t C/ha) y los sistemas de más de 16 años (59,08 t C/ha). Además, la mayor concentración de COS se encontró en la capa superficial del suelo (0-10 cm), siendo el sistema de menos de 8 años el que tuvo la mayor concentración (28,36 t C/ha), seguido por el sistema de más de 16 años (27,74 t C/ha) y el sistema de 8 a 16 años (27,11 t C/ha).

Cruz y Sanjurjo (2016), en su estudio “Cacao y la captura de CO₂”, verificaron que los sistemas de cacao que incluyen árboles maderables y frutales mostraron un aumento significativo en la cantidad de carbono retenido en la biomasa de la parte aérea de los árboles, contribuyendo de forma continua a la presencia de gran cantidad de hojas caídas, actuando como un factor clave para la conservación del suelo y un eficaz regulador de las malas hierbas. Los sistemas agroforestales capturan grandes cantidades de CO₂.

Varios estudios emplean fórmulas para determinar parámetros para estudiar la captura, el almacenamiento o el almacenamiento de carbono, dependiendo de la comprensión de las variables relevantes. Por ejemplo, Timoteo et al. (2016) estimaron el carbono almacenado en tres sistemas agroforestales en Huánuco, Perú. Utilizaron la fórmula $Biomasa = 0,1184 \times 2,53 (DAP)$ para calcular el carbono en la biomasa arbórea, donde D representa el diámetro a la altura del pecho. Para determinar el carbono en la biomasa herbácea, arbustiva y necromasa, las muestras se colectaron en el campo y se secaron en horno a 75 °C hasta peso seco constante. El contenido de humedad (CH) y el carbono total se calcularon utilizando $CH = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) / \text{peso seco}$ y $Biomasa\ Total/Necromasa = \text{peso húmedo total} / (1 + CH)$. Se asumió que el carbono constituía el 50% de la biomasa y la necromasa, respectivamente, y se aplicaron factores de corrección de 0,1 para transformar la biomasa arbórea (t/ha), 0,01 para la biomasa de hierbas y arbustos, y 0,04 para la necromasa. Encina y Torres (2018) estimaron el potencial de almacenamiento de carbono en cultivos de *Musa paradisiaca* (banano) y *Coffea arabica* (café) en Moyobamba, Perú, utilizando la ecuación de Marques (1997): $y = a \times b (H/H^2)$, donde "y" es la biomasa en gramos, "a" = 185,1209, "b" = 881,9471 y "H" es la altura. Para la captura de carbono del banano, se utilizó la ecuación de Días y Melano (2001): $CO_2 = C \times kr$, donde "C" es el carbono de la biomasa y "kr" es una constante de 3,67.

Londoño (2018) en su tesis titulada “Almacenamiento de COS de producción agrícola en cultivo de cacao en ecosistema tropical” busco cuantificar carbono bajo diferentes profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en siete áreas en las cuales tres tienen plantaciones de cacao con sombra asociada (A, B, C), tres de manera convencional (D, E, F) y una sin ninguna intervención antrópica en la cual está siendo protegida hace 20 años (G). Asimismo, hay que mencionar que el orden del manejo vegetal está de acuerdo con los siguientes clones que son

los siguientes CCN 51, EET 8, ICS 65, IMC 67, ICS 90, TSH 565 y SCC 61, respectivamente. La producción con cobertura bajo un sistema de cobertura evidencia un incremento en la captura de recursos orgánicos de carbono con $49,27 \text{ tC ha}^{-1}$ gracias al vínculo vegetal y la aportación de combustible. Es importante destacar la relevancia de la taxonomía y litología. Los procesos de retención del suelo en las etapas de fijación y captura están relacionados directamente con el suelo, dado que están conectados de manera directa con la conservación del carbono, definidas mayoritariamente por la textura, aparente estructura y densidad.

Carvajal y Andrade (2020) en su estudio "Captura de carbono en biomasa de sistemas de usos del suelo", teniendo como objetivo estimar el carbono total almacenado en siete sistemas. Llevaron a cabo un diseño DCA con cinco repeticiones, resultando en 35 unidades experimentales. Crearon áreas de muestreo temporales, recolectando información de 832 árboles de 66 especies diferentes. Calculando la biomasa aérea usando modelos alométricos, basaron sus estimaciones en datos obtenidos en campo (diámetro a la altura del pecho y altura total). La biomasa del sistema radicular fue estimada mediante un modelo general adaptado para bosques tropicales.

En su estudio de 2021, "Captura y retención de carbono a diferentes edades de cacao bajo sistemas agroforestales en Tingo María", Zavala y Vega calcularon el carbono en biomasa mediante la fórmula $CBV(\text{T/ha}) = BVT \times 0,45$, donde CBV es el carbono en la biomasa vegetal (T/ha), BVT es la biomasa vegetal (g) y 0,45 es la proporción de carbono asumida. El carbono del suelo se calculó utilizando $CS (\text{t/ha}) = (PVs \times \% C)$, donde CS es el carbono del suelo (t/ha), PVs es el peso volumétrico del suelo y % C es el porcentaje de carbono almacenado, analizado en el laboratorio. Los resultados mostraron que en el cacao de más de 16 años, la biomasa viva arbórea fue de $609,28 \text{ t/ha}$, la biomasa arbustiva-herbácea fue de $5,8 \text{ t/ha}$ y la biomasa de la hojarasca fue de $18,54 \text{ t/ha}$. En plantaciones menores de 8 años, la biomasa viva arbórea fue de $170,29 \text{ t/ha}$, la biomasa arbustivo-herbácea fue de $5,43 \text{ t/ha}$ y la biomasa de hojarasca fue de $21,50 \text{ t/ha}$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Fue realizado en el caserío de Marona con una fisiografía de Terraza baja, Terraza alta y colina baja la cual se muestra en la Figura 2. Estas parcelas que se encuentran en la región Huánuco, provincia de Leoncio prado y Distrito de Luyando. Los detalles de la ubicación geográfica y altitud se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la ubicación geográfica de las tres unidades fisiográficas en Luyando

Fisiografía	Transecto	Ubicación		
		mE	mN	Altitud m.s.n.m
Terraza alta (Tb)	1 ha	375354.06	8974947.99	735397.93
Terraza baja (Tb)	1 ha	375354.06	8974947.99	735454.78
Colina baja (Cb)	1 ha	375354.06	8974947.99	735511.63

3.1.1. Datos climáticos geológicos y suelos

Los valores promedio mensuales de temperatura más altos se dan entre junio y noviembre (verano), registrándose valores de 28 °C a 33 °C. Por otro lado, las temperaturas promedio mensuales más bajas se dan entre diciembre y Mayo (invierno) registrándose valores de 25 °C y 27 °C. Las lluvias son abundantes (2344 mm en promedio), los ciclos estacionales lluviosos son en febrero, marzo, abril y mayo; el ciclo seco es en junio, julio y agosto (SENAMHI, 2023). Los suelos de la zona de estudio según la clasificación natural de los Estados Unidos de América (Soil Taxonomy, 2016), pertenecen a los órdenes Entisols, Inceptisols y Ultisols

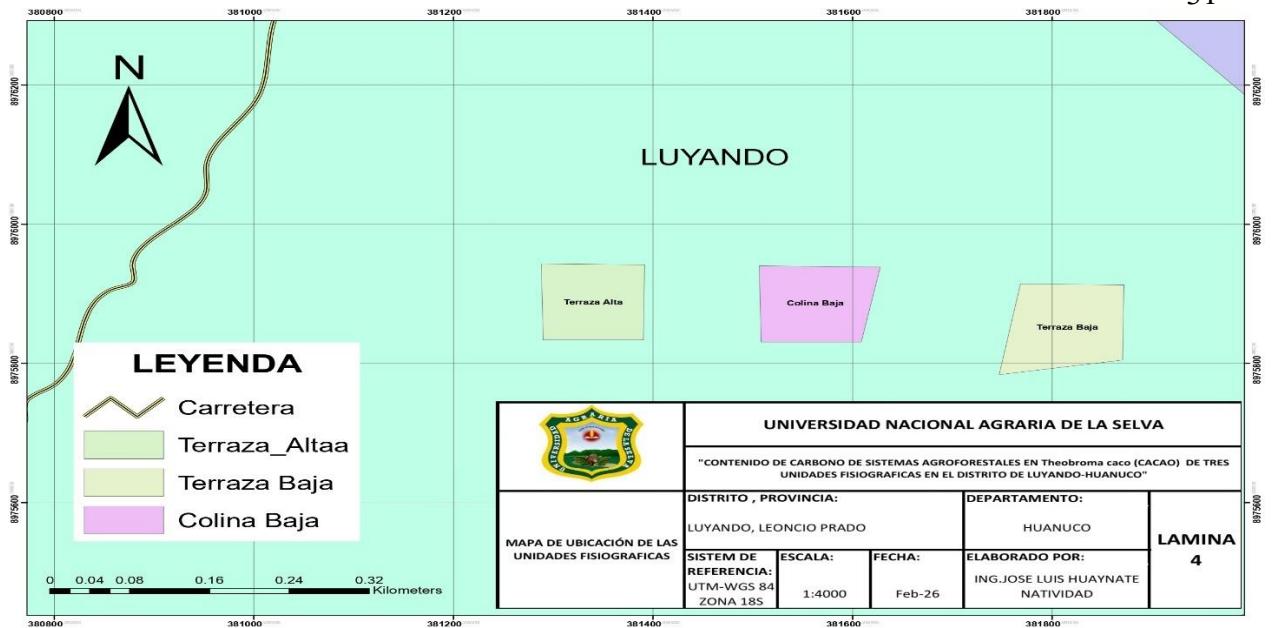


Figura 2. Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza alta (Ta), Terraza baja (Tb) y Colina baja (Cb)

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

3.2.1.1. Materiales

01 wincha de 100 m y 3 m, 02 tijeras de podar, 02 Palas rectas, 02 picos, 04 machetes, 80 cilindros Uhlands de 85 cc, 06 plumones indeleble, 01 millar de papel periódico, 02 millares de bolsas de plásticos de diferentes tamaños, 20 costales de polietileno de 50 Kg, 01 Marco de madera de 1 m x 1 m, 01 Marco de madera de 0,5 m x 0,5 m; 01 docena de lapiceros, 01 docena de lápices, 01 tablero de campo, 02 libretas de campo, 01 cinta métrica, 01 martillo de madera, 01 martillo de Geólogo, 01 tabla Munsell de color de suelos.

3.2.1.2. Equipos

01 GPS, 01 cámara fotográfica, 01 estufa, 01 balanza analítica, 01 equipo de cómputo, 01 calculadora científica.

3.2.2.1. Variables de estudio

a. Variable Independiente: Cultivo de cacao en terrazas y colina.

b. Variable dependiente: Carbono almacenado en plantaciones de cacao CCN-51, carbono en el cultivo de cacao en tres fisiografías, en plantas herbáceas, carbono en las hojarascas, carbono orgánico del suelo y carbono total almacenado.

3.2.2.2. Componentes de estudio

El estudio se efectuó en base a los siguientes componentes que se describen en la Tabla 2. Cabe resaltar que no se trabajó con un modelo experimental específicamente por que se trabajó con puntos de muestreo al azar específicamente a través de 8 transectos en cada parcela

de estudio en las cuales en cada uno de ellos se extrajeron muestras para los parámetros de evaluación, cada parcela tiene 1 ha en promedio.

Tabla 2. Componentes de estudio

Entrada (planta)	Unidad experimental (Fisiografías)	Salida (Parámetros de estudio)
Cacao CCN-51	Terraza baja (Tb)	Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales
Cacao CCN-51	Terraza alta (Ta)	
Cacao CCN-51	Colina Baja (Cb)	

3.2.2.3. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva. La normalidad de los datos se comprobó con la prueba de Shapiro Wilk. Para la comparación de dos muestras independientes, se aplicó la prueba T si existía homogeneidad de varianzas ($p > 0,05$), determinada mediante la prueba de homocedasticidad; de lo contrario, se utilizó la prueba de Wilcoxon.

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Nivel de investigación

La investigación se clasifica como exploratoria-descriptiva a nivel descriptivo, ya que busca caracterizar y comparar el contenido de carbono almacenado en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* CCN-51 en tres unidades fisiográficas (terrazza baja, terraza alta y colina baja) del distrito de Luyando, Huánuco, mediante muestreos sistemáticos en parcelas establecidas, sin intervención experimental directa, pero con experimentos controlados de medición in situ (toma de muestras destructivas y no destructivas) típicos de ciencias naturales.

3.3.2. Tipo de investigación

La investigación se clasificó como de tipo aplicada, dado que recurrió a los enfoques de la ciencia ambiental para determinar el contenido de carbono de sistemas agroforestales en *Theobroma cacao* (cacao) en tres unidades fisiográficas en el distrito Luyando- Huánuco. Aplicada y cuantitativa, orientada a generar conocimiento práctico para el manejo sostenible de sistemas agroforestales de cacao, utilizando datos numéricos (biomasa, carbono en t/ha) obtenidos mediante métodos alométricos y análisis de laboratorio, con pruebas estadísticas paramétricas/no paramétricas para validar diferencias entre unidades fisiográficas. En este sentido, los hallazgos del estudio permitieron generar información en un contexto particular y, a la vez, demostrar la utilidad práctica del conocimiento científico.

3.3.3. Variables de investigación

Variable independiente: Cultivo de cacao en terrazas y colina.

Variable dependiente: Carbono almacenado en plantaciones de cacao CCN-51, carbono en el cultivo de cacao en tres fisiografías, en plantas herbáceas, carbono en las hojarascas, carbono orgánico del suelo y carbono total almacenado.

3.3.4. Matriz de operacionalización

Tabla 3. Matriz de operacionalización

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones /Indicadores	Escala de Medición	Técnica/Instrumento	Fórmula
Cultivo de cacao en terrazas y colina	Categoría geográfica natural que define el relieve y condiciones edafoclimáticas del sitio.	Tb, Ta, Cb (parcelas de 1 ha cada una).	Nominal (3 categorías).	GPS, mapas.	Clasificación directa por coordenadas.
Carbono Total SAF (t/ha)	Cantidad de C almacenado en biomasa vegetal + suelo del sistema agroforestal.	C vegetal (arbórea, cacao, herbácea, hojarasca, raíces) + C suelo.	Razón (t/ha).	Muestreo transeccional (8/parcela), alométrico + Walkley-Black.	$CT=CBV+CSCT$ $= CBV + CSCT=CBV+CS$
Carbono Biomasa Vegetal (CBV, t/ha)	C en componentes vegetales vivos/muertos sobre el suelo.	C cacao, especies arbóreas, plátano, herbáceas, hojarasca, raíces.	Razón (t/ha).	Medición DAP (0.30m cacao, 1.30m arbóreos), secado 75°C.	$CBV=BVT \times 0.45$ $CBV = BVT \times 0.45$ $0.45CBV=BVT \times 0.45$; $BVT=BAVT+BAb-hb+BhBVT =$ $BAVT + BAb-hb + BhBVT=BAVT+ BAb-hb+Bh$
Carbono Suelo (CS, t/ha)	C orgánico total en horizontes estratificados (0-30 cm).	COS por profundidad (0-10, 10-20, 20-30 cm).	Razón (t/ha).	Calicatas, cilindros Uhland, Walkley-Black.	$CS=PVs \times (C/100)$ $CS = PVs \times (C/100)$ $CS=PVs \times (C/100)$; $PVs=DA \times Ps \times 10,000$ $PVs = DA \times Ps \times 10,000$ $PVs=DA \times Ps \times 10,000$
Biomasa Árboles Vivos (BAVT, t/ha)	Peso seco área de árboles >2.5 cm DAP.	DAP especies forestales/cacao.	Razón (t/ha).	Flexómetro, balanza.	$BA=0.1184 \times DAP$ $2.53BA = 0.1184 \times DAP^{2.53}$ $BA=0.1184 \times DAP^{2.53}$;

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones /Indicadores	Escala de Medición	Técnica/Instrumento	Fórmula
					$BAVT = BTAV \times 0.1/0.02$
Biomasa Herbácea/Arbustiva (BAb-hb, t/ha)	Peso seco vegetación <2.5 cm.	Peso fresco/seco en cuadrantes 1×1 m.	Razón (t/ha).	Cuadrantes, estufa 75°C.	$BAb-hb = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.01$ $Ab-hb = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.01$ $0.01BAb-hb = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.01$
Biomasa Hojarasca (Bh, t/ha)	Peso seco residuos caídos (hojas, ramas finas).	Peso fresco/seco en 0.5×0.5 m.	Razón (t/ha).	Cuadrantes, estufa 75°C.	$Bh = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.04$ $Bh = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.04$ $0.04Bh = (PSM/PFM \times PFT) \times 0.04$

3.3.5. Diseño de investigación

Diseño no experimental descriptivo-comparativo, basado en tres unidades de muestreo (parcelas de 1 ha por fisiografía) con 8 transectos paralelos por parcela (codificados A-H para Tb/Ta, I-P para Cb), donde se aplicaron cuadrantes (1x1 m para herbáceas/arbustos, 0.5x0.5 m para hojarasca) y mini calicatas estratificadas (0-10, 10-20, 20-30 cm) para simular experimentos de campo en ciencias naturales, permitiendo comparaciones estadísticas entre tratamientos naturales (fisiografías).

3.3.6. Población y muestra

- **Población:** Sistemas agroforestales de cacao CCN-51 en el caserío Marona, distrito Luyando (Huánuco), distribuidos en tres unidades fisiográficas (Tb, Ta, Cb), con superficie total aproximada de 3 ha (1 ha por unidad).
- **Muestra:** 3 parcelas representativas (n=1 por fisiografía, total N=3), con 8 transectos/parcela (24 transectos totales); submuestras: 24 para biomasa vegetal (8x3), 72 para suelo (8 transectos x 3 profundidades x 3 unidades), seleccionadas por muestreo sistemático aleatorio.

3.3.7. Técnicas e instrumentos de investigación

- **Técnicas:** Inventario alométrico (medición DAP a 0.30 m para cacao, 1.30 m para arbóreos >2.5 cm), muestreo destructivo (cosechas herbáceas/hojarasca en cuadrantes), excavación calicatas para suelo, secado estufa (75°C/105°C), análisis laboratorio (Walkley-Black para COS).

- **Instrumentos:** Metro, flexómetro, balanza (fresca/seca), GPS, cámara fotográfica, estufa, balanza analítica, tabla Munsell (color suelo), cilindros volumétricos (densidad aparente), equipo computo (análisis estadístico).

3.3.8. Análisis de datos

Estadística descriptiva (media, DE, CV, min/max) y inferencial: prueba Shapiro-Wilk (normalidad), homocedasticidad (Levene), prueba t para muestras independientes (normal/homogéneas) o Wilcoxon (no normales), con $\alpha=0.05$ en software estadístico (no especificado, inferido SPSS/R); fórmulas alométricas (Arévalo et al. 2002, EMBRAPA) para biomasa-carbono (factor 0.45), densidad aparente (cilindro), PVs y COS (Walkley-Black).

3.4. Metodología

3.4.1. Selección, delimitación y croquis del área en estudio

Ambas parcelas de cacao aromático y diferentes unidades fisiográficas, manejados bajo el sistema agroforestal, se encuentran en el distrito de Luyando. El SAF con cacao CCN-51 está ubicado en la Terraza baja (Tb), El SAF con cacao CCN-51 está ubicado en la Terraza alta (Figura 4); el SAF con cacao CCN-51 está ubicado en Colina baja (Cb) (Figura 5).

Las parcelas tienen 1 ha en promedio, y se procedió a delimitar ocho transectos dentro de cada parcela (Ver Tabla 1 y Figura 3), en el caso de la fisiografía Terraza baja (Tb) y Terraza alta (Ta) se tuvo los transectos codificados (A, B, C, D, E, F, G y H) y para la fisiografía Colina baja (Cb) (I, J, K, L, M, N, O y P).

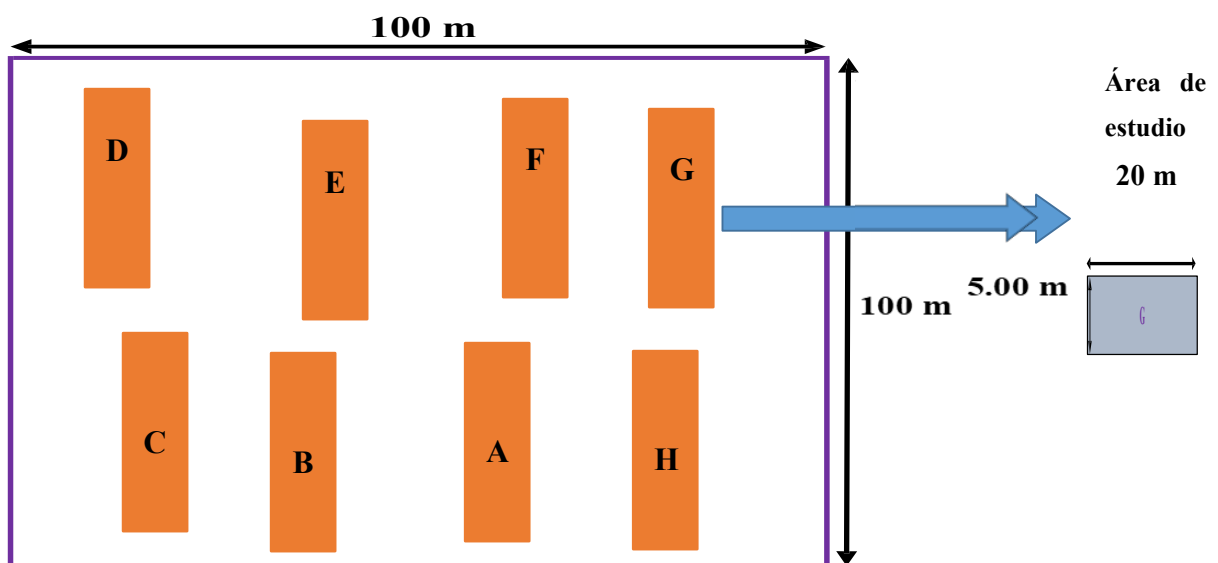


Figura 5. Detalle de la parcela con sus ocho transectos internos

3.5. Parámetros por evaluar de acuerdo con los objetivos

3.5.1. Carbono almacenado en el cultivo de cacao variedad CCN-51 bajo sistemas agroforestales de tres unidades fisiográficas diferentes

Se excavaron mini calicatas en cada cuadrante para recolectar muestras de suelo estratificado a profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Se recolectó un promedio de 500 g de suelo de cada transecto, se codificó adecuadamente y se transportó al laboratorio para la determinación de carbono mediante el método Walkley-Black adaptado por Zavala (2015).

3.5.2. Almacenamiento de carbono de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao en unidades fisiográficas diferentes

El carbono de la biomasa vegetal se estimó mediante el método alométrico (Arévalo et al., 2002), la metodología recomendada por la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), a través de su Centro Nacional de Investigación Forestal, que fue pionero en este estudio en 2022 con la publicación del Documento 73, «Metodología para la estimación del contenido y almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra». Este fue un esfuerzo científico conjunto entre el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) y Embrapa Florestas.

3.5.2.1. Parámetros de estudio

- **Biomasa arbórea viva.** – Se evaluó en rodales de árboles con diámetros superiores a 2,5 cm. En transectos de 5 x 20 cm, se inventariaron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 2,5 cm. El diámetro basal del cacao aromático se midió a 30 cm del suelo (Alegre et al., 2022), mientras que para el componente forestal, el DAP se midió a 1,30 m del suelo para todos los árboles con un DAP superior a 2,5 cm.

- **Biomasa arbustiva (BAb) y herbácea (Hbh).** - Incluyó vegetación del suelo y plantas con diámetros inferiores a 2,5 cm, gramíneas y otras hierbas. El material herbáceo y arbustivo se muestreó directamente utilizando dos cuadrados de 1 m x 1 m distribuidos aleatoriamente en los transectos de 5 m x 20 m (Figura 6). Toda la vegetación se cortó a ras de suelo, se pesó la muestra total y una submuestra se colocó en bolsas de papel y se secó en una estufa de aire caliente a 75 °C durante 48 h hasta alcanzar un peso seco constante.

- **Biomasa seca (hojarasca).** – La capa de hojarasca y otros residuos (ramillas, ramas) se cuantificaron utilizando cuadrados de 0,5 m x 0,5 m colocados dentro de cada uno de los cuadrados de 1 m x 1 m (Figura 6). Toda la hojarasca se colocó en bolsas y se registró su peso fresco total por 0,25 m². Se tomó una submuestra, se registró su peso y se secó en una estufa a 75 °C hasta alcanzar un peso seco constante. de 0,5 m x 0,5 m para hojarasca.

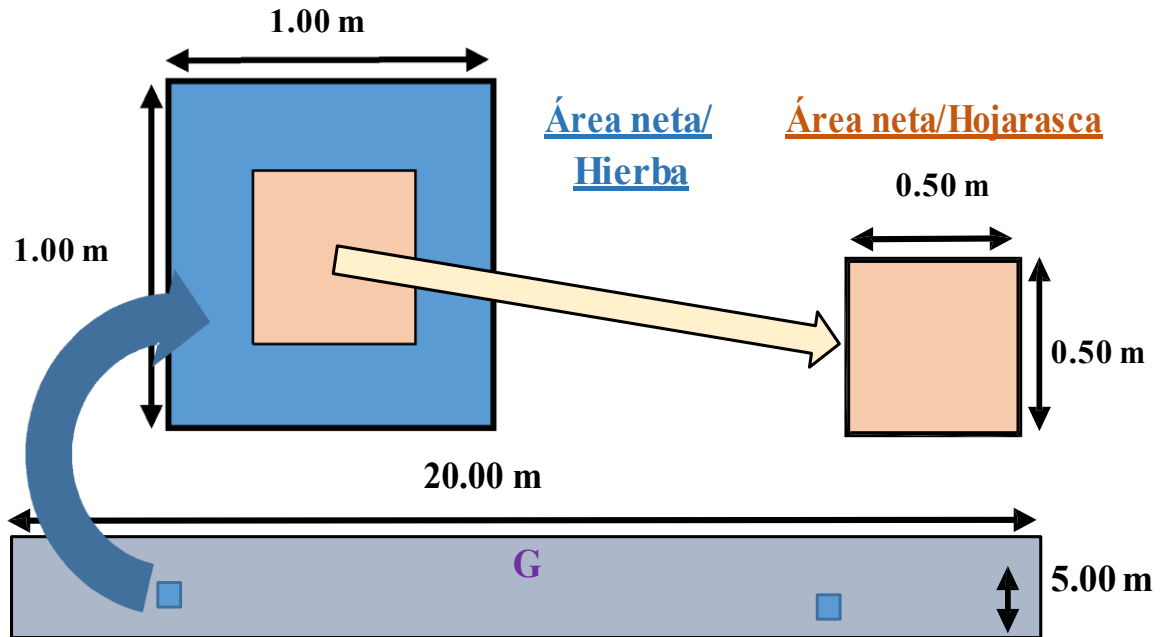


Figura 6. Cuadrantes de 1 m x 1 m para material herbáceo, arbustivo y cuadrantes interiores

3.4.2.3. Fórmulas para el cálculo de los ítems de biomasa

- **Biomasa vegetal.** - Las fórmulas usadas para determinar el carbono aéreo y del suelo fueron las determinadas por Arévalo et al. (2002).

$$BA = 0,1184 \times DAP^{2,53} \quad (1)$$

Donde:

BA	:	Biomasa de árbol individual (kg)
0,1184	:	Constante
2,53	:	Constante
DAP	:	Diámetro a la altura del pecho
1,30 m	:	Especies forestales
0,30 m	:	Plantas de cacao.

• **Biomasa vegetal del plátano (t ha-1).** – Se aplicó la fórmula sugerida por Hairiah et al. (2001), donde solo se considera como variable predictiva el DAP en cm:

$$B = 0,0303 * DAP ^ 2,1345 \quad (2)$$

• **Biomasa arbórea viva (t ha-1).** - Para calcular la biomasa/ha, se sumaron el latizal bajo medidos y registrados en cada parcela y se multiplicó por un valor numérico estipulado en las especificaciones del factor de conversión, a partir de ello se debe escoger la formula a usar:

$$BAVT (t ha^{-1}) = BTAV \times 0,1 \quad (3)$$

ó

$$BAVT (t ha^{-1}) = BTAV \times 0,02 \quad (4)$$

Donde:

BAVT	:	Biomasa de árboles vivos en t ha ⁻¹
BTVA	:	Biomasa total de la parcela
0,1	:	Factor de conversión de la parcela 4 x 25 m
0,2	:	Factor de conversión de la parcela 5 x 100 m

• **Biomasa arbustiva y herbácea (t ha-1):** Esta variable se determinó en conjunto con una sola ecuación:

$$BAb - hb (t ha^{-1}) = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,01 \quad (5)$$

Donde:

BAb - hb	:	Biomasa Arbustiva – Herbácea (t ha ⁻¹)
PSM	:	Peso Seco de la Muestra (g)
PFM	:	Peso Fresco de la Muestra (g)
PFT	:	Peso Fresco Total (g)

El peso seco de esta biomasa se llevó a t ha⁻¹ y se multiplicó por el factor 0,45; obteniéndose la cantidad de carbono existente.

• **Biomasa de la hojarasca (tha-1)**

$$Bh (t ha^{-1}) = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,04 \quad (6)$$

Donde:

Bh (t ha-1)	:	Biomasa hojarasca (t ha ⁻¹)
-------------	---	---

PSM	:	Peso Seco de la Muestra (g)
PFM	:	Peso Fresco de la Muestra (g)
PFT	:	Peso Fresco Total (g)

- **Biomasa Vegetal Total (t ha⁻¹)**

$$BVT (t ha^{-1}) = BAVT + BAb - hb + Bh \quad (7)$$

3.4.2.4. Fórmulas para el cálculo del carbono total (biomasa vegetal más suelo)

- **Cálculo del carbono en la biomasa vegetal total (t ha⁻¹)**

$$CBV (t ha^{-1}) = BVT \times 0,45 \quad (8)$$

Donde:

CBV	:	Carbono en la biomasa vegetal
BVT	:	Biomasa vegetal total
0,45	:	Constante (Brown y Lugo, 1997).

- **Cálculo del carbono en el suelo (t ha⁻¹)**

$$CS (t ha^{-1}) = (PVs \times \% C) / 100 \quad (9)$$

Donde:

CS	:	Carbono en el suelo (t ha ⁻¹)
Pvs	:	Peso del volumen de suelo
% C	:	Porcentaje de carbono analizado en laboratorio
100	:	Factor de conversión

- **Cálculo del carbono total del SAF (t ha⁻¹)**

$$CT (t ha^{-1}) = CBV + CS \quad (10)$$

Donde:

CT	:	Carbono total del SAF
CBV	:	Carbono en la biomasa vegetal total
CS	:	Carbono en el suelo.

3.5.3. Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades fisiográficas.

3.5.3.1. Metodología y parámetros de estudio

- **Carbono orgánico del suelo.** - Se realizó en base a unos cortes en los transectos a una profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm), sacando muestras de suelo codificándose apropiadamente y llevados a laboratorio para su respectiva determinación de carbono por el método de Walkley y Black (modificado).

- **Densidad aparente y peso del suelo.** - se utilizó el método del cilindro, utilizando cilindros de aproximadamente 100 ml de volumen aplicando la fórmula de masa sobre volumen, procediendo a extraer las muestras de suelo a profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Esta muestra de suelo fue llevada a estufa a 105 °C que a cabo de 24 horas se determinó el peso constante.

- **Cuantificación de lombrices y color del suelo.** – a profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) en cada área de estudio en base a los transectos se realizó la contabilización de lombrices. Asimismo, se determinó con la tabla Munshell soil color book, las coloraciones y características del suelo en estudio.

3.5.3.2. Cálculos del peso del volumen del suelo ($t\ ha^{-1}$)

El cálculo partió analizando primero la densidad aparente del suelo por cada uno de los horizontes.

3.5.3.3. Fórmulas para el cálculo de los siguientes parámetros

- **Densidad aparente del suelo ($g\ cc^{-1}$)**

$$DA\ (g\ cc^{-1}) = PSN/VCH \quad (11)$$

Dónde:

DA : Densidad aparente ($g\ cc^{-1}$)
 PSN : Peso seco del suelo dentro del cilindro
 VCH : Volumen cilindro (constante)

- **Peso del volumen de suelo por estrato de muestreo**

$$PVs\ (t\ ha^{-1}) = DA \times Ps \times 10\ 000 \quad (12)$$

Dónde:

PVs : Peso del volumen de suelo ($t\ ha^{-1}$)
 DA : Densidad aparente
 Ps : Espesor o profundidad del horizonte del suelo (m)

10 000 : Constante

• **Cálculo del carbono en el suelo ($t\ ha^{-1}$)**

$$CS\ (t\ ha^{-1}) = (PV_s \times \% C) / 100 \quad (13)$$

Dónde:

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

Pvs : Peso del volumen de suelo

% C : Porcentaje de carbono analizado en laboratorio

100 : Factor de conversión

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Contenido de carbono almacenado en el cultivo de cacao variedad CCN-51 bajo sistemas agroforestales de tres unidades fisiográficas diferentes

A través de la prueba de Shapiro Wilk aplicada a ambas unidades fisiográficas se ha comprobado que los datos tienen una distribución normal. De acuerdo con la Tabla 3 los valores de W^* están próximos a la unidad, lo que indica que los datos no presentan una desviación extrema respecto a la normalidad; esto se comprueba también mediante el p-valor ($> 0,05$).

Tabla 4. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas.

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	D.E.	W^*	p-valor	CV (%)
Terraza baja	CCN-51	8	80,16	22,48	0,96	0,865	28,04
Terraza alta	CCN-51	8	75,12	21,91	0,95	0,855	25,55
Colina baja	CCN-51	8	47,65	14,34	0,95	0,759	30,11

En el mismo sentido, se aplicó la prueba de homocedasticidad, en la cual se obtuvo un valor de 0,259 ($> 0,05$) que indica que existe homogeneidad de varianza, por lo que se aplicó la prueba de T (Tabla 4).

Tabla 5. Prueba de T para la variable contenido de carbono en cacao en tres unidades fisiográficas (t/ha).

Unidad fisiográfica	Variedad	n	Media	Mínimo	Máximo	pHomVar	T	p-valor
Terraza baja	CCN-51	8	80,16	42,65	121,2			
Terraza alta	CCN-51	8	75,12	39,21	115,24	0,259	-3,45	0,0039
Colina baja	CCN-51	8	47,65	23,24	74,37			

El p-valor ($p < 0,05$) obtenido en la prueba de T indica que existe diferencia estadística significativa entre los niveles de carbono almacenado en cacao en las tres unidades fisiográficas.

Esto puede deberse a la variabilidad de las zonas de estudio, además de la calidad de los lugares donde se situaron las tres plantaciones o la calidad genética del material vegetal. El desarrollo y la calidad son influenciados por la relación entre las características genéticas, del ambiente por la competencia por recursos y la gestión de la plantación. Esto concuerda con

lo observado por Concha et al. (2007) al indicar que la retención de carbono no depende de la antigüedad de los sistemas, sino de la variedad de especies presentes en cada uno, así como de las técnicas de silvicultura y del manejo apropiado de la plantación.

Es necesario recalcar que, a pesar de la existencia de varios estudios sobre las reservas de carbono, Bernoux (1998) advierte del problema de las incertidumbres en estas estimaciones, principalmente debido a la densidad de muestreo, la variación de los contenidos de carbono y los métodos utilizados para su cálculo. La certeza es que la variación espacio-temporal, para un área determinada es el saldo líquido entre la entrada y la salida, que está controlado por algunos conductores primarios. Probablemente, que una fisiografía posea diferencia estadística en relación con otra en lo que se refiere a niveles de carbono, es gracias a sus conductores primarios que tienen propiedades que ejercen un mayor control sobre el carbono.

Los principales impulsores estarían relacionados con el contenido de M.O., en las regiones tropicales; asimismo se destacan la estructura, humedad del suelo, manejo, clima y mineralogía (Telles et al., 2003). En este sentido, los resultados de la presente investigación son diferentes a lo reportado por Chinchay (2024), quien concluye que no hay diferencia estadística en el almacenamiento del carbono de plátano de tres unidades fisiográficas en Huanganapampa (Terraza baja, terraza media no inundable y terraza alta); la autora lo atribuye a que el uso del suelo no influye significativamente en la captura de carbono independientemente de su tipo fisiográfico, pues para el caso de especies temporales el aporte de carbono se ve quebrado ya que es en pequeñas cantidades, sumado a ello la cantidad de material que queda como cobertura es menor en relación a un cultivo perenne.

La Tabla 4 muestra una mayor predominancia de carbono almacenado en el cultivo de cacao, variedad CCN-51, en la Terraza baja (Tb), donde se registró un valor máximo de 121,20 t/ha y un promedio de 80,16 t/ha. Le sigue la Terraza alta (Ta), con un valor máximo de 115,24 t/ha y una media de 75,12 t/ha. En contraste, la Colina baja (Cb) presentó valores significativamente menores, con un máximo de 74,37 t/ha y un promedio de 47,00 t/ha. Estos resultados evidencian diferencias marcadas en el almacenamiento de carbono entre las tres unidades fisiográficas evaluadas, tal como se detalla en la Tabla 4 y la Figura 7.

Cabe resaltar que cuando hablamos de fisiografía son conocidos los suelos aluviales y residuales; referente a la investigación, estos corresponden a Terraza baja (Tb) y colina baja (Cb), respectivamente.

Resultados opuestos a lo observado en la Tabla 4 fueron verificados por Mesías-Gallo et al. (2018) que, en suelos con clima tropical, no se registra un nivel elevado de almacenamiento de carbono, a diferencia de lo que se encontró en las zonas altas del área de su estudio, donde se presentan suelos bajo bosques primarios o secundarios que superan los valores de almacenamiento de carbono. Los autores indican que esto sucede por varias razones; en primer lugar, se trata de suelos jóvenes, formados por sedimentos aluviales recientes, que, a pesar de estar en áreas tropicales, no almacenan grandes cantidades de almacenamiento de carbono. Además, son suelos con características aluviales, con capas de arena en las secciones superior y media del perfil, lo que impide de manera sistemática y continua la captura de carbono en el suelo y resultando en un menor contenido de carbono en comparación con los que se encuentran bajo bosques. En el presente estudio el mayor contenido de carbono en el suelo y mayor contenido de carbono en el cultivo de cacao pertenecen a la Terraza baja (Tb), lo que probablemente se debe al tiempo de instalación del cultivo.

No se ha encontrado resultados investigaciones referentes al almacenamiento de carbono en las variedades estudiadas (CCN-51) en la presente investigación, por lo cual este trabajo marca una relevancia ya que se obtuvo importante información de estas variedades de cacao fino de aroma en Perú.

Una investigación más próxima, pero no con las variedades en estudio fue encontrada en Barrezueta et al. (2018) en su estudio de Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro-Ecuador con la intención de evaluar áreas cultivadas con cacao del tipo Nacional (cacao fino de aroma) mediante un SAF con 45,555 Mg de C ha⁻¹ y áreas del clon de cacao CCN51 como modelo en monocultivo con 33,096 Mg de C ha⁻¹.

De acuerdo con los resultados de Barrezueta et al. (2018), el cacao fino de aroma mostró mayor almacenamiento de carbono; sin embargo, no verificaron diferencias significativas con el clon de cacao CCN51. Los autores expresan que los niveles de carbono secuestrado en suelos de clima tropical y con predominancia de arena poseen poca diferencia entre sus ratios siendo el manejo lo que realmente influye en los contenidos altos o bajos de almacenamiento de carbono. Pocomucha et al. (2016), evaluaron el carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao CCN-51 en provincia de Leoncio Prado – Perú, donde el carbono almacenado en SAF de cacao en el suelo presentó 65,57 t C ha⁻¹. Los autores atribuyen a que la variación de almacenamiento se debe a la asociación con especies de madera y frutas presentes.

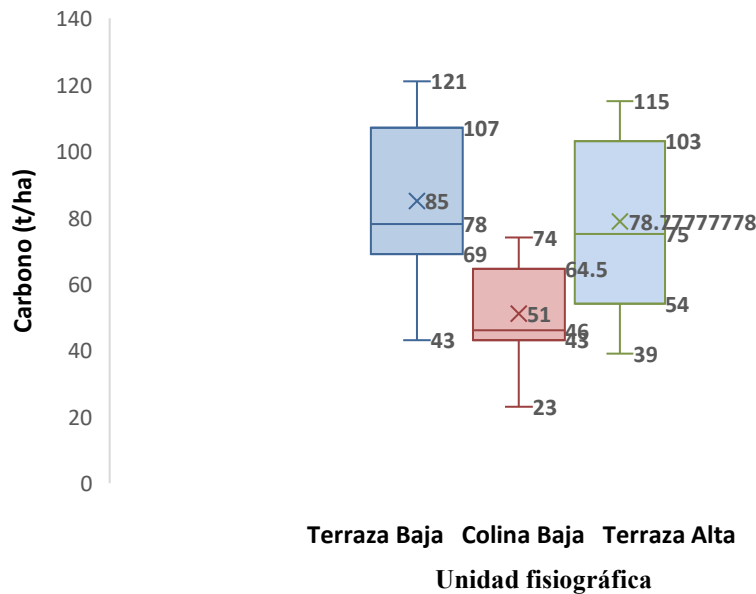


Figura 7. Diagrama de caja de carbono almacenado en cacao CCN-51 en tres unidades fisiográficas.

La Tabla 4 y la Figura 7 muestran el nivel de carbono almacenado en cacao en las unidades fisiográficas. La diferencia probablemente sea por el origen genético de su material vegetal, tiempo de instalación del cultivo y exposición al medio ambiente; estas características junto con el aporte de residuos orgánicos característico de los SAF, regulan la acumulación de la materia orgánica y del carbono del suelo.

Londoño (2018) estudió la cantidad de carbono bajo diferentes profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en bajo la unidad fisiográfica montañosa en siete áreas, en las cuales tres poseen un sistema de producción de cacao con sombra asociada, tres de manera convencional y una sin ninguna intervención antrópica, la cual está siendo protegida hace 20 años. Dichas áreas corresponden a materiales híbridos y clones (ICS 65, ICS 90, TSH 565, IMC 67, EET 8, CCN 51 y SCC 61). El autor ha encontrado que los sistemas de cultivo de cacao poseen una gran habilidad para acumular carbono en el suelo mediante la acumulación y mineralización de desechos vegetales de especies relacionadas con el cultivo. Esto se manifiesta en niveles de captura más elevados en los modelos productivos implementados bajo coberturas de 50,27 tC ha⁻¹, dado que incrementan la aportación de materia orgánica al suelo, lo que favorece el almacenamiento de carbono a través de la acumulación en el perfil del suelo.

Probablemente el comportamiento en la presente tesis se justifica debido a que, en las terrazas bajas, la cobertura vegetal está representada por cultivos y vegetales leñosos, además, la presencia de estos individuos vegetales es bastante densa lo que no permite áreas con suelo desnudo. A su vez, la presencia de arbustos y yerbas perennes, como kudzu, malezas etc., hace que la acumulación de hojarasca sea constante en el tiempo, teniendo en

consideración que esta fisiografía tiene 12 años de funcionamiento. Probablemente los valores bajos de carbono en la zona de Colina se deben a que los principales procesos de pérdida de carbono en el suelo se deberían a lixiviación, erosión, volatilización y descomposición (aeróbica o anaeróbica). Sumada a esta condición es necesario resaltar que esta fisiografía tiene 6 años menos de actividad con relación a la otra fisiografía. Segundo Corado Neto et al. (2015), las pérdidas de carbono pueden estar asociadas con condiciones con baja cobertura vegetal y alto escurrimiento de agua superficial, siendo este último asociado a la conformación del terreno en una determinada topografía.

4.2. Almacenamiento de carbono de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao en unidades fisiográficas diferentes

Tabla 6. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para el contenido de carbono por componente vegetal en tres unidades fisiográficas de Luyando

C por especies (n/ha)	Unidad fisiográfica	n	Media	D.E.
Forestales	Terraza baja	8	87,75	40,64
	Terraza alta	8	76,35	35,26
	Colina baja	8	9,29	7,05
Plátano	Terraza baja	8	1,28	0,86
	Terraza alta	8	1,17	0,73
	Colina baja	8	0,83	0,51
Cacao	Terraza baja	8	80,16	22,48
	Terraza alta	8	62,23	19,24
	Colina baja	8	47,65	14,34
Herbáceas	Terraza baja	8	0,26	0,26
	Terraza alta	8	0,32	0,25
	Colina baja	8	0,45	0,21
Hojarasca	Terraza baja	8	2,47	1,3
	Terraza alta	8	2,35	1,31
	Colina baja	8	2,01	1,25
Radicular	Terraza baja	8	0,9	0,17
	Terraza alta	8	0,9	0,16
	Colina baja	8	0,88	0,48

En la Tabla 5 se muestra la prueba de Shapiro Wilk aplicada a ambas unidades fisiográficas en los distintos componentes del sistema agroforestal. De acuerdo al p-valor $> 0,05$ en la mayoría de los casos, los datos presentan una distribución normal, a excepción del contenido de carbono almacenado en las herbáceas, por lo que posteriormente se aplicó la prueba de homocedasticidad y la prueba T (paramétrica) o Wilcoxon (no paramétrica).

Chinchay (2024) al determinar el contenido de carbono almacenado (t/ha) en la biomasa vegetal en tres parcelas de plátano como SAF, no encontró diferencias estadísticas de carbono en las especies forestales. Esto podría deberse a que la acumulación no está siendo influenciada por su fisiografía, sino por el tipo de suelo.

En la Tabla 6 se presenta la prueba de homocedasticidad y el p-valor mediante la prueba de T si $p_{HomVar} > 0,05$; y la prueba de Wilcoxon si $p_{HomVar} < 0,05$. De acuerdo al p-valor, se ha encontrado diferencia estadística significativa en el carbono almacenado en las especies forestales y en el cacao entre las tres unidades fisiográficas.

Respecto al carbono en las especies forestales, se tiene que el máximo nivel se encuentra en la Terraza baja (Tb) con una media de 87,75 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 76,35 t/ha mientras que en la Colina baja (Cb) se calculó una media de 9,29 t/ha. En el cultivo de plátano se determinó mayor valor en la Terraza baja (Tb) con una media de 1,28 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 1,17 t/ha mientras que en Colina baja (Cb) el valor fue de 0,83 t/ha. En la variable carbono en cacao, se calculó mayor nivel en la Terraza baja (Tb), con una media de 80,16 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 62,23 t/ha mientras que en la Colina baja (Cb) el cálculo de la media fue de 47,65 t/ha. Para el contenido de carbono en las herbáceas y arbustos el mayor valor se ha registrado en la Colina baja (Cb), con una media de 0,45 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 0,32 t/ha mientras que en la Terraza baja (Tb) se reporta una media de 0,26 t/ha. En cuanto al carbono en la hojarasca, se encontró un máximo de almacenamiento en Terraza baja (Tb) con una media de 2,47 t/ha y Terraza alta (Ta) con media de 2,35 t/ha mientras que por el contrario, la menor media se registró en Colina baja (Cb), con un valor de 2,01 t/ha. Por último, el máximo nivel promedio de carbono en las raíces se calculó en Terraza baja (Tb) y Terraza alta (Ta) una media de 0,90 t/ha respectivamente y mientras que el menor promedio fue de 0,88 t/ha calculado en Colina baja.

En base a los resultados de la Tabla 6 se puede indicar que ambas fisiografías evaluadas muestran resultados favorables en relación con almacenamiento de carbono, es decir que el sistema agroforestal presenta una habilidad para capturar carbono orgánico, gracias a la asociación de plantas y la contribución de biomasa. Es fundamental destacar el papel que juegan la taxonomía y la litología del suelo en los mecanismos de fijación y absorción de carbono, ya que están directamente ligadas al almacenamiento del carbono, lo cual depende principalmente de la textura, la estructura y la densidad aparente del suelo.

Probablemente el bajo contenido de carbono en las hojarasca y raíces se debe a que la cantidad de C acumulado en los suelos es determinada gracias al equilibrio que va de la agregación de material vegetal en descomposición, también denominado necromasa o material muerto, específicamente como la hojarasca y raíces añadido a las mermas sufridas durante los procesos de pudrición y mineralización, teniendo a manera de ejemplo a la respiración heterotrófica. Estrada (2023) encontró valores más elevados del carbono orgánico en las raíces de cacao (4,12 t C ha⁻¹) que lo calculado en la presente investigación. El autor manifiesta que las raíces del cultivo de cacao poseen un gran tamaño pues su sistema radicular es proporcional con su tamaño, quiere decir que cuentan con raíces mucho más profundas superando el metro de profundidad.

Tabla 7. Prueba de T y de Wilcoxon para el valor de carbono en los componentes vegetales en tres unidades fisiográficas en Luyando.

C por especies (tn/ha)	Unidad fisiográfica	N	Media	Mínimo	Máximo	pH om Var	Valor	p-valor
Forestales	Terraza baja	8	87,75	9,28	144,78	0,0001	*39,00	0,001
	Terraza alta	8	76,35	10,22	132,12			
	Colina baja	8	9,29	0,58	22,9			
Plátano	Terraza baja	8	1,28	0,11	2,13	0,2922	**0,09	0,934
	Terraza alta	8	1,17	0,1	1,98			
	Colina baja	8	0,83	0,25	1,69			
Cacao	Terraza baja	8	80,16	4,65	121,2	0,259	**0,45	0,003
	Terraza alta	8	62,23	37,45	101,23			
	Colina baja	8	47,65	23,24	74,37			
Herbáceas	Terraza baja	8	0,26	0,09	0,87	0,5232	*86,00	0,065
	Terraza alta	8	0,32	0,03	0,81			
	Colina baja	8	0,45	0,2	0,76			
Hojarasca	Terraza baja	8	2,47	0,63	4,91	0,985	**0,71	0,488
	Terraza alta	8	2,35	0,73	3,21			
	Colina baja	8	2,01	0,81	4,56			
Radicular	Terraza baja	8	0,9	0,6	1,18	0,0135	*60,00	0,442
	Terraza alta	8	0,9	0,3	1,13			
	Colina baja	8	0,88	0,4	1,73			

La biomasa de las especies forestales representa el mayor sumidero de carbono, ya que su secuestro aumenta con la edad y la biomasa. Los sistemas con mayor crecimiento de biomasa presentan una mayor acumulación de C debido a la fuerte correlación entre estas variables (0,45 a 0,50 %, IPCC, 2000). Como señalaron Taiz y Zeiger (1998), el almacenamiento de carbono se produce mediante el secuestro atmosférico de carbono mediante la fotosíntesis y la respiración, almacenándose posteriormente en la biomasa y el suelo.

De acuerdo con lo mencionado en el párrafo anterior, es de esperarse que en la Terraza baja (Tb) se encontraran mayores valores promedio de carbono almacenado tanto en las especies forestales (87,75 t/ha) como en el cacao (80,16 t/ha), debido a que este SAF tiene 12 años de instalado, mientras que el SAF de colina baja tiene 6 años. En el mismo sentido, Zavala et al. (2018) obtuvieron valores de 609,28 tC/ha en SAF mayores a 16 años y 170,29 tC/ha en SAF menores de 8 años. Sin embargo, estos valores también estarán relacionados a las condiciones y mantenimiento que el agricultor brinda a la plantación; por ejemplo, Gonzales (2018) evaluó estas variables en un SAF de café de 4 años y uno de 8 años, obteniendo como resultado que la biomasa fue de 29,55 y 24,79 t/ha respectivamente. El motivo fue que esta última plantación resultó atacada por la roya amarilla 4 años antes de la evaluación, lo que generó gran mortandad y por ende pérdida de biomasa vegetal.

En ambas unidades fisiográficas, los niveles de carbono son mayores en la hojarasca que en las plantas herbáceas. Esto se debe a que los sistemas agroforestales estudiados presentan una cantidad limitada de especies herbáceas debido al mantenimiento agrícola, lo cual restringe el crecimiento de arbustos y herbáceas, lo que resulta en una abundante hojarasca. Los niveles de carbono en la hojarasca son generalmente mayores que en las plantas/arbustos herbáceos y las raíces debido a la constante y mayor contribución de la materia vegetal muerta que cae naturalmente. Sin embargo, el carbono de la hojarasca suele ser un componente pequeño en términos de biomasa, lo que hace que su inclusión a veces sea discrecional (Chidiak et al., 2003). Los promedios de C de hojarasca calculados en Terraza baja (Tb) (2,47 t/ha) y Colina baja (Cb) (2,01 t/ha) son menores a lo obtenido por Dávila (2023), quien reportó 3,48 t/ha, concluyendo que los terrenos usados como plantaciones de capirona y bolaina, purma y maíz tienen mayor capacidad de almacenamiento. Por su parte, Gonzales (2018) obtuvo un valor de 25,72 t/ha en un SAF de 4 años, posiblemente porque la plantación estuvo en constante crecimiento y desarrollo por lo cual hay mayor brotamiento de hojas y labores de poda, además de que los cultivos utilizados son café y guaba. Las labores silviculturales afectan directamente a la cantidad de biomasa y carbono debido a la formación del mantillo, por lo que en ocasiones puede haber un bajo nivel de incorporación al suelo según la intensidad del manejo.

De acuerdo con los resultados de la presente investigación y las mencionadas, se coincide con Alpizar et al. (1983) quienes mencionan que se debe considerar la variedad del cultivo utilizado, así como la sombra, la densidad y la época de muestreo.

El contenido de carbono en las herbáceas arroja medias de 0,45 (Colina baja - Cb) y 0,26 t/ha (Terraza baja - Tb). Estos datos son menores a lo reportado por Gonzales (2018), quien en un SAF de 4 años determinó 1 t/ha. Por su parte, Zavaleta et al. (2018) en un SAF de 12 años obtuvo un valor de 0,95 t/ha debido a que en la plantación presentaba poca cobertura.

De acuerdo con la Tabla 7, el nivel de C almacenado en las especies forestales de la Terraza baja (caoba y shimbillo) supera ampliamente a lo calculado en la Colina baja (bolaina, capirona, guaba y pumaquiro). En los cultivos agrícolas también ha sido posible calcular una gran diferencia con superioridad en la Terraza baja. En el mismo sentido, las herbáceas, arbustos, hojarasca y raíces sumaron un total de 3,63 y 3,34 t/ha, respectivamente.

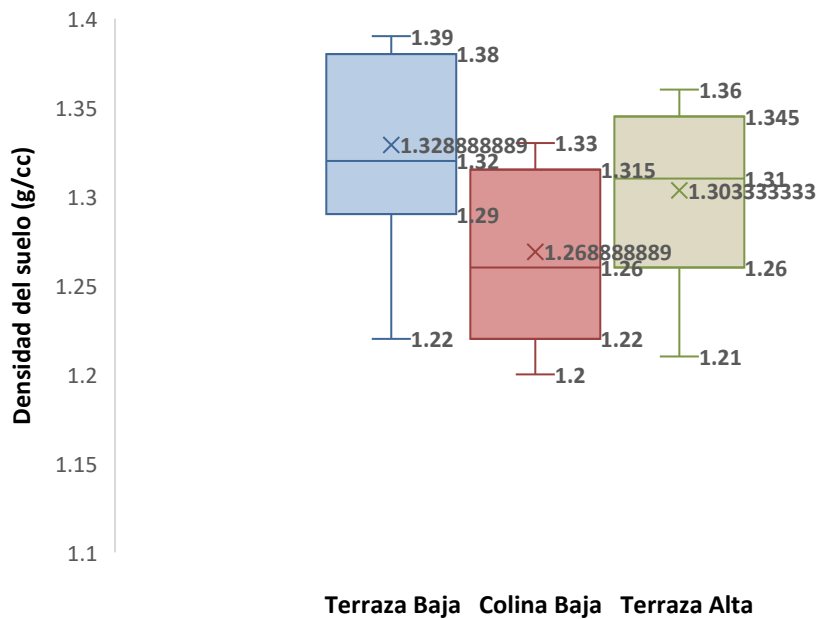
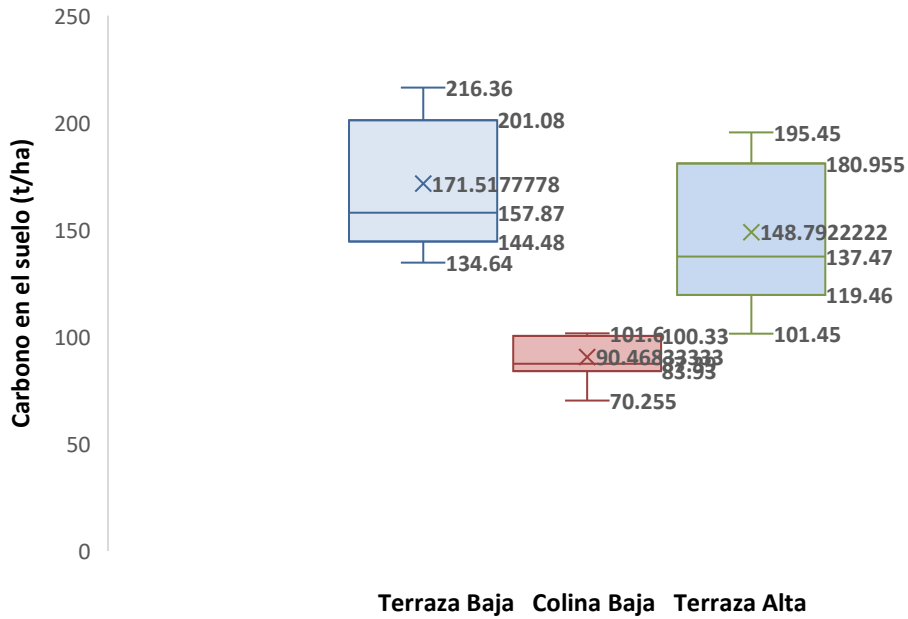
Los resultados se basan en variaciones en la biomasa vegetal, pero también pueden atribuirse a las condiciones del suelo, el clima regional y el manejo silvicultural de los cultivos de cacao. En contraste con el estudio de Mondragón (2019), que obtuvo una biomasa de 22,68 t/ha en una plantación de cacao de 6 años, esta investigación estimó 47,65 t C ha⁻¹ para un SAF de la Colina baja también de 6 años. Esta diferencia probablemente se deba a un manejo subóptimo del SAF en la zona de estudio de Mondragón, así como a la influencia de la variedad del cacao, las características del sitio, el tipo de suelo, los componentes y los factores climáticos en el almacenamiento de C.

Tabla 8. Carbono almacenado (t/ha) en los diferentes componentes del sistema agroforestal.

Unidad fisiografica	Componentes	Especies	Biomasa (tn/ha)	Carbono (tn/ha)	BV SAF (tn/ha)	Carbono vegetal SAF (tn/ha)
Terraza baja	Forestal	Caoba	183,63	82,63		
		Shimbillo	137,29	61,78		
	cultivo agricola	Platano	2,85	1,28		
		Cacao	178,13	80,16	509,95	229,48
	Herbaceas, arbustos	Herbaceas-arbustivas	0,58	0,26		
	Hojarasca radicular	Hojarasca	5,48	2,47		
Radicular		1,99	0,9			
Terraza baja	Forestal	Bolaina	100,21	82,63		
		Capirona	98,56	61,78		
		Guaba	54,21	82,63	373,48	157,32
		Pumaquiro	38,54	61,78		
	cultivo agricola	Platano	2,85	1,28		
		Cacao	178,13	80,16		
	Herbaceas, arbustos	Herbaceas-arbustivas	0,58	0,26		
	Hojarasca radicular	Hojarasca	5,48	2,47		
Radicular		1,99	0,9			
Colina baja	Forestal	Bolaina	33,87	15,24		
		Capirona	10,28	4,63		
		Guaba	11,22	5,05		
		Pumaquiro	11,07	4,98		
	cultivo agricola	Platano	1,85	0,83		
		Cacao	105,87	47,65	181,58	81,72
	Herbaceas, arbustos	Herbaceas-arbustivas	1,00	0,45		
	Hojarasca radicular	Hojarasca	4,48	2,02		
Radicular		1,94	0,87			

Las estimaciones de captura de carbono en biomasa varían debido a que el contenido de carbono difiere según la especie arbórea y el tipo de tejido (Francis, 2000; Gifford, 2000; Soares y Oliveira, 2002). La gravedad específica, o peso seco por unidad de volumen, también varía entre especies y condiciones ambientales (Valenzuela, 2001). Para proyectos de captura de carbono, Gayoso et al. (2002) enfatizan la cuantificación del carbono con base en datos específicos de cada especie, ya que esta información biológica impacta significativamente la cantidad de carbono secuestrado.

4.3. Evaluación de los parámetros de carbono en el suelo, densidad aparente del suelo, peso del volumen del suelo, lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades fisiográficas



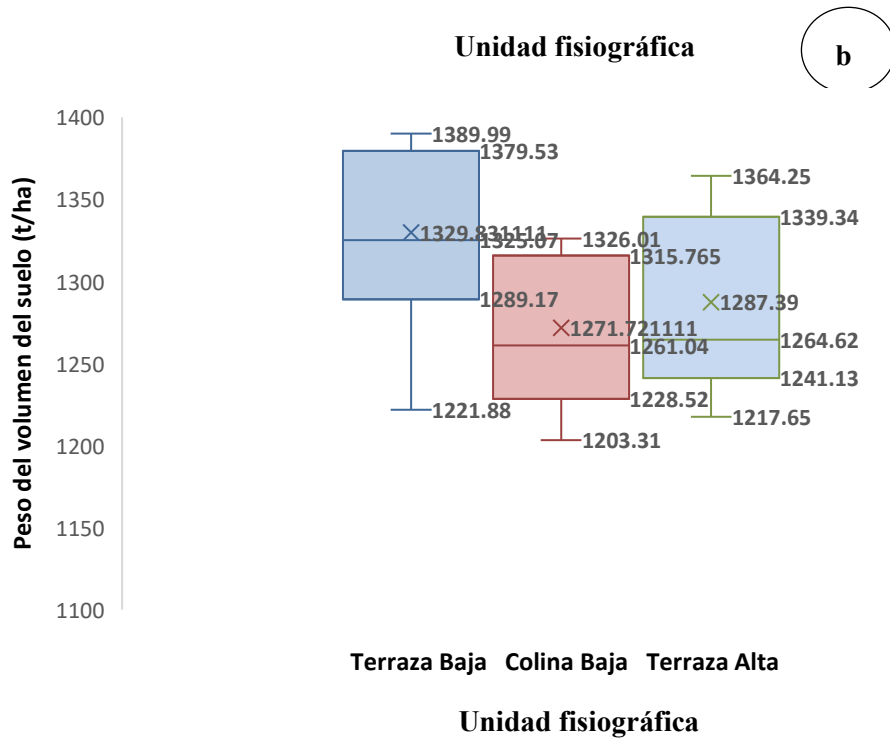


Figura 8. Diagrama de caja de variables correspondientes al suelo de tres unidades fisiográficas.

Resultados semejantes fueron observados por Dávila (2024) al encontrar diferencias estadísticas altamente significativas al estudiar el almacenamiento de COS de las unidades fisiográficas (Terrazas alta, media, baja y baja no inundable) del fundo CIPTALD – Tulumayo. El autor atribuye a que el uso del suelo afecta de forma significativa en la captura de carbono de cada tipo fisiográfico.

El p-valor de la prueba de T (Tabla 9) muestra que la Terraza baja (Tb) presentó mejor resultado estadísticamente en los promedios de carbono en el suelo (157,87 t/ha), densidad aparente del suelo (1,32 g/cc) y peso del volumen del suelo (1 321,08 t/ha).

Tabla 9. Prueba T para muestras independientes en las variables del suelo.

Variable	Terraza	n	Media	D.E.	W*	p-valor	(CV)%
Carbono en el suelo (t/ha)	Terraza baja	8	157,87	36,24	0,91	0,4635	20,33
	Terraza alta	8	137,47	31,2	0,90	0,4612	20,57
	Colina baja	8	83,93	17,07	0,84	0,1053	22,96
Densidad aparente del suelo (g/cc)	Terraza baja	8	1,32	0,05	0,94	0,7399	4,16
	Terraza alta	8	1,31	0,05	0,94	0,7355	4,11
	Colina baja	8	1,26	0,04	0,96	0,8713	3,43
Peso del volumen del suelo t/ha)	Terraza baja	8	1321,08	54,34	0,95	0,7966	4,11
	Terraza alta	8	1305,65	49,98	0,95	0,7722	4,05
	Colina baja	8	1264,62	42,39	0,95	0,7695	3,35

En la unidad fisiográfica de Terraza baja se ha encontrado mucho mayor carbono almacenado en comparación con la Colina baja (157,87 t/ha y 83,93 t/ha, respectivamente) y menor materia orgánica (1,786 %) (Figura 18) que en esta última (2,068 %) (Figura 19). Esta diferencia de niveles puede deberse principalmente a que en la Terraza baja se encuentran árboles forestales de mayor edad y diámetro, lo que contribuye a una mayor entrada de carbono al suelo por haber recibido más aportes de M.O a lo largo del tiempo; asimismo, el suelo tiende a ser más profundo y con mayor capacidad de retención de humedad, lo cual favorece a la acumulación de carbono en el suelo.

Van y Kuikman (1990) señalan que en suelos arcillosos se verifica mayores contenidos de materia orgánica y carbono en relación a los suelos arenosos, gracias a la protección física que brinda a la materia orgánica. En este sentido, el suelo en Colina baja (Cb) presenta mayor porcentaje de Arcilla (59 %) en relación a la Terraza baja que solo posee 27 % (Figura 18 y 19). Según Tisdall y Oades (1982) esta protección se manifiesta cuando la materia orgánica es adsorbida sobre las partículas de arcillas o limos o probablemente debido a la incrustación o cubrimiento por minerales del tamaño de las arcillas. Sánchez-Hernández et al. (2006) indican que también puede deberse porque la M.O está fuera del alcance de los microorganismos al encontrarse dentro del proceso de la agregación del suelo.

Matus y Maire (2000) indican que la retención de materia orgánica depende del equilibrio entre la adición y la mineralización, estando esta última influenciada por la calidad

del material orgánico aportado y la tasa de mineralización del carbono en las partículas de arcilla, así como por la cantidad de carbono en el suelo, más que por la cantidad de arcillas o de materia orgánica. De igual manera, Espinoza et al. (2007) señalan que el carbono en el suelo está determinado por la cantidad y calidad de los residuos que se incorporan, no por su distribución. Krasilnikov et al. (2007) añaden que la diversidad de suelos en zonas montañosas y tropicales, con variaciones en acidez, composición de materia orgánica, mineralogía de arcillas y propiedades del complejo de intercambio, se debe a la diversidad en el uso del suelo, sus funciones ecológicas, los materiales parentales y la antigüedad de las superficies expuestas.

Los resultados de carbono en el suelo superan a lo reportado por Dávila (2023), quien al estudiar los niveles de carbono en distintas terrazas encontró valores entre 20,92 y 32,01 tC/ha, determinando mayor C en la Terraza media. Asimismo, Zavala et al. (2018), obtuvieron resultados inferiores a lo mostrado en la presente investigación, determinando 66,16 tC/ha en el suelo del SAF menor a 8 años y 59,08 tC/ha en el suelo del SAF mayor a 16 años. Los sistemas agroforestales (SAF) jóvenes almacenan más carbono en el suelo que los SAF maduros debido a la mayor acumulación de biomasa proveniente de la hojarasca. Esto permite una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo. Salazar et al. (2018) confirmaron esto, reportando que un SAF con café de 3-5 años almacenó 224,26 t/ha de carbono, mientras que uno de 8-10 años almacenó 195,5 t/ha. Estas diferencias se deben a diversos factores. Robert (2001) explica que la presencia de carbono en el suelo está relacionada con la formación del suelo a largo plazo y representa un equilibrio dinámico entre la absorción de material muerto y la mineralización. Además, el cambio de uso del suelo de bosque natural a plantación asociada genera una acumulación de material orgánico cuya biomasa influye en el contenido de carbono del suelo.

Se observaron diferencias estadísticas en la densidad del suelo entre las fisiografías estudiadas (Tabla 9), siendo la Terraza baja (Tb) la que presentó los mejores resultados en cuanto a densidad aparente y carbono. Por lo tanto, la densidad aparente es un atributo clave para el secuestro de carbono, ya que influye en el espacio poroso y la cantidad de partículas de arcilla y limo, que definen el área disponible para la fijación y captación de carbono. La acumulación de materia orgánica está vinculada no solo al secuestro de carbono, sino también a la mejora de las características del suelo, lo que facilita un aumento de las tasas de fijación y absorción de carbono. Comprender las condiciones del suelo, incluyendo el paisaje, el clima, el relieve, la litología, la taxonomía, la pendiente y las unidades cartográficas, es crucial para las etapas de secuestro de carbono, ya que estos factores afectan el comportamiento y el tipo de material presente. Si bien todos los suelos pueden fijar carbono,

sus niveles de captura varían debido a sus propiedades específicas. Londoño (2018) realizó observaciones similares, señalando que las densidades aparentes tienden a aumentar con la profundidad debido al peso del suelo, la vegetación superficial y la composición litológica, lo que reduce el espacio poroso y afecta la dinámica del carbono.

Asimismo, ante lo manifestado en el párrafo anterior se puede atribuir también que la densidad en las fisiografías es muy similar ($T_b=1,32 \text{ g/cc}$ y $C_b = 1,26 \text{ g/cc}$) las cuales corresponden a un suelo Franco arcilloso y Arcilloso, respectivamente (Figura 18 y 19). Se recalca que la mayor cantidad de carbono en la Terraza baja quizá se deba a que en esta fisiografía la plantación tiene más años de instalada. Esto pone en relevancia a las prácticas agrícolas llevadas a cabo en el estrato superficial del suelo, ya que estas afectan la acumulación de residuos vegetales y el crecimiento de las raíces de las plantas, optimizando las condiciones edáficas para el almacenamiento de carbono derivada de la biomasa y el intercambio de gases. Barreuzeta et al. (2018) encontraron densidades aparentes similares ($1,37 \text{ g/m}^3$) en suelos cultivados con cacao fino de aroma (Franco arenosos) y el clon CCN 51 (Franco limosos) en la provincia El Oro, Ecuador. La densidad aparente varía según el uso del suelo (Agostini et al., 2014), oscilando entre $1,42$ y $1,50 \text{ g/cm}^3$ en agricultura extensiva y por debajo de 1 g/cm^3 en suelos poco explotados (UNLP, 2019). Alvarado y Forsythe (2005) señalan que valores inferiores a $1,9 \text{ g/cc}$ favorecen el desarrollo radicular y reducen la compactación y erosión. En concordancia, Gutiérrez y Levano (2023) observaron mayor densidad aparente en monocultivos de cacao ($1,44 \text{ g/cm}^3$) que en sistemas agroforestales con pino chuncho ($1,25 \text{ g/cm}^3$) en Luyando, atribuyendo la diferencia al manejo del suelo. Resultados similares fueron reportados por Cerda (2018), quien encontró una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$ en cacao de monocultivo y $0,83 \text{ g/cm}^3$ en cacao con laurel, y por Koicheoski (2022), quien encontró $1,04 \text{ g/cm}^3$ en sistemas agroforestales de cacao.

En la última variable, peso del volumen del suelo, se obtuvieron resultados ligeramente superiores a lo reportado por Pérez (2023), quien determinó una media de $1\ 116,45 \text{ t/ha}$ y $1\ 046,69 \text{ t/ha}$ en SAF's de 12 y 8 años, respectivamente.

Por último, en la Tabla 10 se presenta el total de carbono almacenado en cada unidad fisiográfica objeto de la investigación.

Tabla 10. Total de carbono almacenado por unidad fisiográfica.

Unidad fisiográfica	Carbono vegetal (tn/ha)	Carbono del suelo (tn/ha)	Carbono total SAF (tn/ha)
Terraza baja	229,48	57,87 +- 36,24	387,35 +- 36,24
Terraza alta	157,32	131,47 +- 36,24	294,79 +- 36,25
Colina baja	81,72	83,93 +- 36,24	165,65 +- 36,24

Por su parte, la Tabla 11 presenta los resultados de la verificación de la calidad del suelo basados en la Tabla de color de Munsell. Cabe mencionar que es una referencia a modo de resumen y que los valores se detallan en los Anexos, Tabla 18.

Tabla 11. Cuantificación de lombrices y coloración de suelo dentro de tres unidades fisiográficas a diferentes profundidades.

Unidad fisiográfica	Prof. (cm)	Lombriz	Color	Descripción
Terraza baja (Tb)	0-10	59	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
	0-20	25	7,5 YR 4/6	Marrón amarillento
	0-30	7	7,5 YR 5/6	Marrón amarillento
Terraza alta (Ta)	0-10	47	7,5 YR 3/2	Marrón oscuro
	0-20	19	7,5 YR 4/6	Marrón amarillento
	0-30	4	7,5 YR 5/6	Marrón amarillento
Colina baja (Cb)	0-10	16	5 YR 3/1	Marrón amarillento
	0-20	5	5 YR 4/4	Amarillento
	0-30	1	5 YR 5/6	Amarillento

Los colores del suelo observados en este estudio variaron de gris muy oscuro a marrón amarillento, marrón rojizo, marrón oscuro y amarillo rojizo, lo que sugiere la presencia de óxidos de hierro. Como indica Vargas (2009), el color del suelo está influenciado por partículas de óxido de hierro (amarillo, marrón, naranja y rojo), materia orgánica humificada (oscura), óxidos de manganeso (negro) y material parental. Loli (2012) señala que los suelos más oscuros son generalmente más favorables para el cultivo de cacao debido a sus menores tasas de lixiviación, un hallazgo respaldado por Arvelo et al. (2017), quienes afirman que el cacao prefiere suelos con un horizonte húmico oscuro y uniforme. Con base en estas observaciones, los suelos estudiados pueden ser menos adecuados para el cultivo de cacao. Sin embargo, Vara (2016) reportó buenos rendimientos de cacao en suelos con colores marrón amarillento, marrón oscuro, marrón y marrón pálido.

La coloración del suelo también es más oscura en la superficie y reduce a medida que aumenta el rango de profundidad del suelo de 10-20 cm y 20-30 cm (Tabla 11). En el caso de Colina baja (Cb), se observó una coloración que va de una tonalidad gris hasta una tonalidad amarillenta; mientras que, en la Terraza baja (Tb), la coloración determinada fue mayormente de marrón oscuro a marrón fuerte, encontrándose en el horizonte O gran descomposición de hojarasca y humificación. Según Martínez y Palacio (2010) esto también puede deberse a la tasa de desgaste de la M.O., conllevando a la disposición elementos nutricionales; sumado a ello, también el pH del suelo es un atributo que influye en la descomposición de la M.O. El cacao se desarrolla de manera efectiva cuando el pH varía de 6 a 6,5 (Figura 18 y 19). El alto contenido del material orgánico mejora el desarrollo del cacao porque garantizaría la presencia de micronutrientes en desenvolvimiento de la planta. Asimismo, así como mayor presencia, la Tabla 9 indica que el mayor contenido de carbono se encuentra en Terraza baja (Tb); sin embargo, la Colina baja (Cb) de cacao TSH-

565 es un sistema agroforestal de 06 años, mientras que la Terraza baja (Tb) de cacao VRAE-15 tiene 12 años, por lo cual esta última posee menor cantidad de materia orgánica en el suelo (1,79 %) en comparación con la Colina baja (Cb) (2,06 %) (Anexo, Figura 18 y 19). Gutierrez y Levano (2023) encontraron que los sistemas agroforestales de cacao con pino chuncho presentaron un mayor contenido de MOS (2,99 %, nivel medio) en comparación con el monocultivo de cacao (0,96 %, nivel bajo). Dado que el cacao requiere niveles medio-altos de materia orgánica (Loli, 2012), estos resultados sugieren una ventaja de los sistemas agroforestales, lo cual coincide con lo reportado por Ávila et al. (2013), quienes señalan que la asociación del cacao con árboles incrementa la materia orgánica debido al aporte de hojarasca. Esta relación también se vincula con prácticas de fertilización que incorporan abonos orgánicos (Flórez y Gómez, 2019) y la presencia de cobertura vegetal, viva o muerta, en el suelo (Sánchez et al., 2005).

La actividad biológica por presencia de macrofauna (lombrices y hormigas) es mayor en los primeros 10 cm del suelo, y se ve disminuida mientras la profundidad del suelo aumenta; en el mismo sentido, Harmand et al. (2006), indica que la MOS es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en distintos estados, y que la actividad de los microorganismos depende directamente de la cantidad de carbono disponible en cualquier tiempo pues es la fuente de energía o el sustrato sobre el que estos se alimentan. En cuanto a los organismos del suelo, se encontró actividad de la mesofauna y macrofauna, contabilizando un total de 91 lombrices en los transectos de la Terraza baja (Tb) y 22 en la Colina baja (Cb), de los cuales la mayoría estuvieron a una profundidad de 0-10 cm reduciendo

gradualmente su presencia hasta los 30 cm que se tomaron las muestras de ambas unidades fisiográficas. Los estudios a largo plazo que existen ayudan a responder preguntas como si el rendimiento del cultivo principal se ve afectado por la presencia de las especies asociadas y si estas juegan un papel clave en el aporte de nutrientes, el soporte de la macrofauna y la mejora del secuestro de carbono. Además de almacenar y secuestrar carbono, los sistemas agroforestales también pueden influir potencialmente en la biodiversidad del suelo subterráneo (Cardinel et al., 2019). Esta diversidad incluye organismos como las lombrices de tierra, que son una de las biotas más importantes del suelo porque influyen en los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo (Juárez-Ramón y Fragoso, 2014; Tao et al., 2012). Sus movimientos crean poros que facilitan la dinámica de los nutrientes y el agua en el suelo (Lavelle et al., 1987). Las poblaciones y la diversidad de lombrices de tierra varían entre hábitats terrestres debido a las variaciones en la humedad del suelo, la temperatura del suelo, las propiedades del suelo, la abundancia de biomasa aérea, los tipos de vegetación, la gestión del uso de la tierra y las intervenciones humanas (Blouin et al., 2013; Zhang et al., 1993). Por ejemplo, en un sistema agroforestal con *Solanum quitoense* y *Selenicereus megalanthus* en la Amazonía ecuatoriana, se encontró que la abundancia de lombrices de tierra variaba de 73 a 114 y de 70 a 100 individuos, respectivamente, y, en un monocultivo, de 42 a 67 y de 51 a 91 individuos, respectivamente; de igual modo, la abundancia de lombrices de tierra depende de la temporada de muestreo, observándose más lombrices de tierra en la temporada de lluvias que en la temporada seca (Vargas et al., 2020; Vargas et al., 2022).

V. CONCLUSIONES

- El contenido de carbono almacenado por el cultivo de cacao, variedad CCN-51, presentó diferencias entre las unidades fisiográficas evaluadas. En la Terraza baja (Tb) se registró un promedio de 80,16 t/ha, seguido por la Terraza alta (Ta) con 75,12 t/ha; mientras que la Colina baja (Cb) mostró el menor contenido de carbono almacenado, con 47,65 t/ha.
- El almacenamiento de carbono de las plantas de cacao CCN-51, especies arbóreas, herbáceas y hojarasca de los tres sistemas agroforestales de cacao CCN-51 en unidades fisiográficas diferentes presentaron para la Terraza baja (Tb) 387,35 t/ha de carbono total almacenado dentro del SAF; para la Terraza alta (Ta) 294,79 t/ha de carbono total almacenado dentro del SAF mientras que, en la Colina baja (Cb), almacena se almacenó 165,65 t/ha del total de carbono vegetal almacenado dentro del SAF.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Dado que existen diversos criterios metodológicos para calcular el almacenamiento de carbono, es importante determinar las variables posibles de un ecosistema específico pues se consideran la altitud, especies forestales asociadas, grado de infestación de purmas y pastizales, época de muestre, entre otros.
- Realizar la valorización de los sistemas agroforestales para compensar los servicios ambientales como captura de carbono en los agricultores y/o productores.
- Continuar con los trabajos de investigación relacionados en diversos sistemas agroforestales, para buscar establecer parámetros y estándares de captura de carbono.

VII. REFERENCIAS

- Albrecht, A. y Kandji, S. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry system. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 99(1-3), 15-27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880903001385?via%3Dih>
- Alegre, J; Arevalo, L; Ricse; Callo-Concha, D y Palm, Ch. (2002). Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú [Ponencia]. *IV Congreso Brasileño de Sistemas Agroflorestais*. Ilhéus, Bahía. Brasil. <https://www.redalyc.org/pdf/629/62980202.pdf>
- Alpizar, L., Fassbender, H. y Heuvelop, J. (1983). *Estudios de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE, Turrialba*. Departamento de recursos naturales Renovables, CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1811>
- Alvarado, A. y Forsythe, W. (2005). Variaciones de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29, 85-94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312831>
- Amores, F., Butler, D. Ramos, G., Sukha, D., Espin, E., Zambrano, A., Hollywood, N., Van Loo, R. y Seguíne, E. (2007). *Project to determine the physical, chemical and organoleptic parameters, ICCO/06 (CFC)*. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/6.-Determine-the-Physical-and-Organoleptic-parameters-to-differentiate-between-Fine-and-Bulk-Cocoa-1.pdf>
- Arvelo, M., González, D., Maroto, S., Delgado, T. y Montoya, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao, prácticas latinoamericanas*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6181>
- Arévalo L; Alegre, J. y Palm. (2002). *Determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra*. World Agroforestry Centre y CODESU. Lima, Perú. <https://www.cifor-icraf.org/es/conocimiento/publicacion/27681/>
- Arévalo L; Alegre, J. y Palm. (2003). Manual para la determinación de las reservas total de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24p.
- Ávila, A., Campos, M., Guharay, F. y Camacho, A. (2013). *Aprendiendo e innovando sobre el manejo de fertilidad de suelos cacaoteros*. Lutheran World Relief https://cadenacacaoca.info/CDOCDeployment/documentos/19_Guia_4_Fertilidad_de_Suelos.pdf
- Barel, M. (2005). Comment fonctionne le commerce du cacao dans le monde. *Chocolat et confiserie magazine*, 410, 10-14. <https://agritrop.cirad.fr/528861/>
- Barel, M. (2009). *Du cacao au Chocolat, l'épopée d'une gourmandise*. Éditions Quae.

- Barrezueta, U. S., Luna-Romero, E. y Barrera-León, J. (2018). Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro-Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 154-161. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>.
- Blouin, M.; Hodson, M.E.; Delgado, E.A.; Baker, G.; Brussaard, L.; Butt, K.R.; Dai, J.; Dendooven, L.; Peres, G. y Tondoh, J.E. (2013). a review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64, 161–182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Brown, S. y Lugo, A. (1997.) *Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon Interciencia* 17. FAO. <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s05.htm>; 05/05/ 2015)
- Cambardella, C. (1998). *Experimental verification of simulated soil organic matter pools*. In Lal L., Kimble J. M., Follett R.A., Stewart B.A. eds. Soil processes and the carbon cycle. CRC Pres. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=77968>
- Carvajal, B.N. y Andrade, H.J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de usos del suelo. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/587>
- Centeno, J. (1992). *El Efecto Invernadero*. PLANIUC. 18 – 19: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/CR.UNA01000109794/Details>
- Cerda, R. (2018). *Calidad de Suelos en Plantaciones de Cacao (Theobroma Cacao L.), Banano (Musa AAA) y Plátano (Musa AAB) en el Valle de Talamanca, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5551>
- Concha, J.; Alegre, J. y Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6, 75-82. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v6n1-2/a09v6n1-2.pdf>
- Cruz, A. y Sanjurjo, C. (2016). *Cacao y la captura de CO₂*. EAP Ingeniería ambiental, facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad Peruana Unión, Filial Tarapoto.
- Chapin, F. S., Iii, P. A. Matson, y H. A. Mooney (2002). Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Chidiak, M., Moreyra, A. y Greco, C. (2003). *Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina*.

- <http://www.territorioscentroamericanos.org/ecoagricultura/Documents/capturadecarbonoydesarrolloforestal.pdf>
- Dávila, V. (2023). *Almacenamiento de carbono en el suelo de las unidades fisiográficas del fundo CIPTALD – Tulumayo, Tingo María – Huánuco*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/573e96a1-2e1a-4818-a3a0-61501b92a088/content>
- Dixon, R.K. (1995). SAF's y gases invernadores. *Agrofloresteria en las Américas*, 2(7), 22-27. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6822>
- Encina, T. y Torres, M, V. (2018). *Determinación del potencial de captura de carbono en los cultivos de (plátano) Musa paradisiaca y (café) Coffea arabica. Moyobamba, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20,500.12692/31647/Encina_LTTorres_DMV.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Espinoza, Y., Lozano Z. y Velásquez, L. (2007). Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia*, 32(8), 554-559. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000800012&lng=es&tylng=es
- Estrada, T. Y. X. (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 de pregrado, Universidad Nacional Agraria De La Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/46812eb2-d498-43e9-9851-b802d075eb80/content>
- Francis, J. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in puerto rican secondary forests. *Caribbean journal of science*, 36(3), 346-350. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/30106>
- Fischer, A. y Vasseur, L. (2002). Smallholder Perceptions of Agroforestry. Projects in Panama. *Agroforestry Systems*, 54, 103-113. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015047404867>
- Food and Agriculture Organization (1998). *Agroforestería para la producción animal en América Latina*. FAO. www.fao.org/documentos.
- Food and Agriculture Organization (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institut national de*

- recherche agronomique.* FAO.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d8b7252e-03c2-4116-8b6c-ebd5ca3c9662/content>
- Gama-Rodrigues, A.C.D.; Barros, N.F.D.; Gama-Rodrigues, E.F.D.; Freitas, M.S.M.; Viana, A.P.; Marciano, C.R. y Carneiro, J.G.D.A. (2006) *Sistemas agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável*. [Tesis de pregrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro].
https://www.researchgate.net/publication/289534112_Sistemas_Agroflorestais_Bases_Cientificas_para_o_Desenvolvimento_Sustentavel
- Gayoso, J.; Guerra, J. y Alarcón, D. (2002). *Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas*. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile.
<http://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/5666>
- Gifford, R. (2000). *Carbon contents of aboveground tissues of forest and woodland trees*. Canberra: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical Report No. 22. <http://www.ncl.ac.uk/press.office/press.release/item/soil-sucks-up-65-000-tonnes-of-co#.UdLWWRqDPtQ>
- Gonzales, J. (2018). *Carbono almacenado en sistemas agroforestales de Coffea arabica L. (café) de 4 y 7 años en relación con la gradiente altitudinal, Huánuco*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1476/JFGR_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gregorich, E. G., Drury, C.F., Ellert, B.H. y Liang, B.C. (1996). Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 60, 472 – 476.
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100020016x>
- Gutierrez, T. L. V. y Levano, C. J.D. (2023). Efecto de sistemas agroforestales y monocultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en los indicadores físico del suelo. *Revista de investigación y Amazonia*, 3 (16), 1-9.
<https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/312>
- Götsch, E. (1995). *Break-through in agriculture*. AS-PTA.
<https://www.naturefund.de/fileadmin/images/Studien/Goetsch-break-through-in-agriculture.pdf>

- Hairiah, K.; Sitompull, S.M.; Noordwijk, M. Van. y Palm, C. (2001). *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. In: Noordwijk, M. Van.; Williams, S.; Verbist, B. (Ed.). *Towards integrated natural resource management in forest margins of the humid tropics: local action and global concerns*. ICRAF. ABS Lecture Note 4 A, Bogoi, <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/LN01035.pdf>
- Harmand, J.M., K. Hergoualc'h, S. De-Miguel-Magaña, B. Dzib, P. Siles y Vaast, P. (2006). *Carbon sequestration in coffee agroforestry plantations of Central America*. In: ASIC, editor, 21st International Conference on Coffee Science. CIRAD, Montpellier, FRA. p. 1071-1074. https://www.researchgate.net/publication/237836766_Carbon_Sequestration_in_Coffee_Agroforestry_Plantations_of_Central_America
- Hernández, L. (2001). *Densidad de biomasa aérea en bloques extensos del neotrópico húmedo. Caso de la Cuenca del Río Caura, Venezuela*. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 24-34.
- Higuchi, N.; Santos, J.; Ribeiro, R. J.; Minette, L. y Biot, Y. (1998). Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazônica* 28(2), 153-165. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282166>
- Houghton, R. y Woodwell, G. (1989). *Cambio Climático Global*. Investigación y Ciencia. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2000). *Land use, Landuse Change, and Forestry*. (IPCC). https://unfccc.int/documents?f%5B0%5D=topic%3A669ysearch2=ysearch3=yitems_per_page=10yorder=field_document_type_1ysort=descypage=%2C%2C19
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2004). *Climate change. spatial report on emissions scenarios*. Intergovernmental panel on climate change (IPCC). <http://grida.no/climate/ipcc>. 2015.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (2007). *Synthesis report: Climate change 2007*. Ginebra, Suiza. (IPCC). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/ipcc-fourth-assessment-synthesis-report-climate-change-2007>
- International Centre For Research In Agroforestry (1983). *Agroforestry systems inventory (AFSI) project coordinators's report for the period September 1982 – June 1983*. (ICRAF). <http://www.worldsagroforestrycentre.org/>

- International Centre For Research In Agroforestry (2004). *Agroforestry defined*. In: International center for research in agroforestry. ICRAF. <http://www.ciesin.org/ic/icraf>
- Juárez-Ramón, D. y Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoology.*, 30, 637–654. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372014000300013
- Kato, O. R.; Kato, M. S. A.; Carvalho, C. J. R.; Figueiredo, R. De O.; Camarão, A.; Sá, T. D. De A.; Denich, M. y Vielhauer, K. (2006) *Uso de agroflorestas no manejo de florestas secundárias*. In: Gama-Rodrigues, A. C. et al. (Org.). CBSAF. Campos dos Goytacazes. Anais Campos dos Goytacazes: UENF. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adyid=305148ybiblioteca=vazyioybusca=\(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22\)yqFacets=\(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22\)ysort=ypaginacao=typaginaAtual=14](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adyid=305148ybiblioteca=vazyioybusca=(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22)yqFacets=(autoria:%22CAMAR%C3%83O,%20A.%22)ysort=ypaginacao=typaginaAtual=14)
- Kalacska, M.; Sanchez-Azofeifa, G.A.; Calvo-Alvarado J.C.; Quesada, M.; Rivard, B. y Janzen, D.H. (2004). Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 200, 227-247. https://www.researchgate.net/publication/222689681_Species_composition_similarity_and_diversity_in_three_successional_stages_of_a_seasonally_dry_tropical_forest
- Ketterings, Q.M.; Coe, R.; Noordwijk, M. Van.; Ambagau, Y. y Palm, C.A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146, 199-209. <https://www.scielo.sa.cr/scieloOrg/php/reference.php?pid=S1659-13212013000200011ycaller=www.scielo.sa.crylang=en>
- Koicheoski, R. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en cuatro sistemas de uso (cacao, plátano, café y purma) ubicados en el caserío los cedros, distrito José Crespo y Castillo* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2371>
- Krasilnikov, P. N. E., García C. y Galicia, P. M. (2007). Soil developed on different parent materials. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 335-344. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315558001>
- Lapeyre, T. Alegre, J. y Arévalo, L. (2004). Determinación de las Reservas de Carbono de la Biomasa Aérea, en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en San Martín, Perú.

- Ecología Aplicada*, 3(1 – 2), 35-44. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162004000100006yscript=sci_abstract
- Lavelle, P.; Barois, I.; Cruz, I.; Fragoso, C.; Hernandez, A.; Pineda, A. y Rangel, P. (1987). Adaptive strategies of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta), a *Peregrine Geophagous* earthworm of the humid tropics. *Biology and Fertility of Soils*, 5, 188–194. <https://doi.org/10.2307/2389178>
- Leitão-Filho, H.F.; Pagano, S.N.; Cesar, O.; Timoni, J.L. y Rueda, J.J. (1993). *Ecologia da mata atlântica em Cubatão*, SP. EDUNESP/EDUNICAMP. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/1993/01/ecologia-da-mata-atlantica-em-cubatao-sp/>
- Loli, O. (2012). *Análisis de suelos y fertilización en el cultivo de cacao*. Oficina Académica de Extensión y Proyección Social de la Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-b-cacao.pdf>
- Londoño, O. J. A. (2018). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos de producción agrícola en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en ecosistema tropical. *RIDUM*, https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3622/Articulo%20Investigaci%C3%B3n_Ortiz_Jaime_2018..pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Luizão, F. J.; Tapia-Coral, S.; Gallardo-Ordinola, J.; Silva, G. C.; Luizão, R. C. C.; Trujillo-Cabrera, L.; Wandelli, E. y Fernandes, E. C. M. (2006). *Ciclos biogeoquímicos em agroflorestas na Amazônia*. In: CBSAF. 6., 2006, Campos dos Goytacazes. Anais... Campos dos Goytacazes: UENF. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/679162/ciclos-biogeoquimicos-em-agroflorestas-na-amazonia>
- Machado, P.L.O.A. (2005). Carbono no solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, 28(2), 329-334. <https://www.scielo.br/j/qn/a/CB6Dn3MwxgLYNcdmwjYmvZF/>
- Márquez T. (2005). *Cálculo de biomasa y captura de carbono en cuatro sistemas agroforestales diferentes de café con sombra en la estación experimental del Instituto de Cultivo Tropicales*. Perú.
- Martínez, G. y Palacio, C. (2010). *Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao fresco y fermentado mediante espectroscopia de absorción atómica de llama*. [Tesis de pregrado, Universidad industrial de Santander]. Repositorio institucional UIS. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/397/2/136115.pdf>

- Martius, C., Hofer, H., Garcia, M.V.B., Rombke, J. y Hanagarth, W. (2004). Litterfall, litter stocks and decomposition rates in rainforest and agroforestry sites in central Amazonia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68, 137-154. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000017468.76807.50>
- Martins, S.V. y Rodrigues, R.R. (1999). Produção de serrapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no Município de Campinas, SP. *Revista Brasileira de Botânica*, 22(3), 405-412. <http://www.bioline.org.br/request?cf09013>
- Matus, F. J. y C. R. Maire G. (2000). Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/28470>
- Mcginley, K. y Finegan, B. (2002). *Evaluation for sustainable forest management*. CIFOR: CATIE. [http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/2009/Red%20IARNA_07\(13\)/adjuntos/publicaciones-venta-catie.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/2009/Red%20IARNA_07(13)/adjuntos/publicaciones-venta-catie.pdf)
- Mesías-Gallo, Freddy W., Hernández-Jiménez, Alberto, Vera-Macías, Leonardo R., Guzmán-Cedeño, Ángel M., Cedeño-Sacón, Ángel F., Ormaza-Cedeño, Katty P., y López-Alava, Geoconda A. (2018). Reservas de carbono orgánico en suelos de la llanura fluvial Calceta-Tosagua, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 27-33. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0258-59362018000400004yIng=esytIng=es.
- Mondragón, G. G. L. (2019). Carbono total almacenado en una plantación de *Theobroma cacao* L. en condiciones de Ceja de Selva - Bellavista - Jaén [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De Jaén]. Repositorio institucional UNJ. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/122>
- Montagnini, F. y Nair, P.K.R. (2004) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61, 281-295. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Nair, P. K. R.; Gordon, A. M. y Mosquera-Losada, M. R. (2008). Agroforestry, In: Jorgensen, S.E., Fath, B.D. (eds): *Ecological engineering. encyclopedia of ecology*. 1(1), 101-110. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92318-5_6
- Nair, P.K.R. y Nair V.D. (2003). *Carbon storage in North American agroforestry systems*. In: J. Kimble, L.S. Heath, R.A. Birdsey and R. Lal (eds). *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4wDkmXYI/>

- Nair, P. K. R.; Kumar, B. M. y Nair, V. D. (2009). Agroforestry as strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 172, 10-23. https://theses.cz/id/qjaeo6/zaverecna_prace_Archive.pdf
- Oliveira, R.E. (1997). *Aspectos da dinâmica de um fragmento florestal em Piracicaba-SP: silvigênese e ciclagem de nutrientes*. [Tesis de maestría, Universidad de São Paulo]. Repositorio Digital USP. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-20191218-161539/?ylang=pt-br>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (2005). *Opening markets for environmental goods and services. Policy Brief*, OCDE. https://www.vista-analyse.no/site/assets/files/5737/va-rapport_2014-08_apec_list_assessment.pdf
- Organização Internacional do cacau (2008). *Revisão do anexo “c” do acordo internacional do cacau*. ICCO. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/chocolates-finos-e-de-aroma/cacau-fino-e-requerimentos-de-mercado>
- Ordoñez, A. (1999). Captura de carbono en un bosque templado. El caso de San Juan Nuevo. Michigan. Instituto Nacional de Ecología SEMARNAP. http://140.84.163.2:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/168/296_1999_Captura_a_cabono_san_juan_Michoacan.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Oosterrooht, Von M. (2002). Manejo de SAF's. *Agroecologia Hoje*, 15, 12-13. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/676189/1/Doc30.pdf>
- Palm, C.; Tomich, T.; Van Noordwijk, M.; Vosti, S.; Gockowski, J.; Alegre, J. E. y Verchot, L. (2004). Mitigating GHG emissions in the humid tropics: Case studies from the alternatives to slash-and-burn program (ASB). *Environment, Development and Sustainability*. 6, 145-162. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3604-6_8
- Pérez, M. V. (2023). Efecto de la variedad y edad del cultivo de (café) *Coffea arabica* L. en el carbono almacenado y los servicios ecosistémicos de SAF's en la zona de La Divisoria. [Tesis de Maestría, Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/f52b2f93-c553-42fe-8448-b8695bf618e2>
- Pocomucha, V. S., Alegre, J. y Abregú, L. (2016) Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15(2), 107-114. <https://www.redalyc.org/journal/341/34149036006/html/>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (1997). Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. PNUD. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Pulrolnik, K. (2009). *Transformações do carbono no solo*. Embrapa Cerrados. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/664366/1/doc264.pdf>
- Puget, P., Chenu, C. y Balesdent, J. (1995). Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science*. 46, 449 – 459. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01341.x>
- Rao, M.R.; Nair, P.K.R. y Ong, C.K. (1998). Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38, 3–50. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005971525590>
- Robert, M. (2001). Soil carbón sequestration for improvement land management. FAO. World Soil Resources Report N° 96. Rome. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/download/18586/18318/19134
- Santos, G.A. y Gamargo, F.A.O. (1999). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis. <https://www.scienceopen.com/document?vid=b8192581-7d2c-4ef0-868f-ed434d09e0f8>
- Santos, A. M. (2009). *La filière cacao-chocolat au Bresil et en France (Fondements basiques pour une stratégie du cacao brésilien)*. Relatório de pós-doctorado. Moisa/Supagro. Montpellier, França. https://theses.hal.science/tel-04069061/file/21-0035_Santos.pdf
- Santos, G. B. M., Santos, P. B. M. y Santos, A. M. (2019). *Cacau fino: conceitos e evolução no Brasil*. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC: e UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz. <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/ceplac/publicacoes/chocolates-finos-e-de-aroma/cacaufino-conceitos-e-evolucao>.
- Sánchez, L., Parra, D., Gamboa, E. y Rincón, J. (2005). Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del estado Táchira, Venezuela. *Bioagro*, 17(2), 119-122. [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev17\(2\)/8.%20Rendimiento%20de%20una.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev17(2)/8.%20Rendimiento%20de%20una.pdf)
- Sánchez-Hernández, R., V. M. Ordaz-Chaparro, G. S. Benedicto-Valdés, C. I. Hidalgo-Moreno y D. J. Palma-López. (2006). Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 22(1), 13-26. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15402202>

- Salazar, A., Saucedo, J., y Méndez, L. (2018). Evaluación de la captura de carbono en suelos de sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en los distritos Mariscal Benavides y Longar, provincia Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 1(1) 1-7. <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/261/906#>
- Smith, N.; Dubois, J.; Current, E.; Lutz, E. y Clement, C. (1998). *Experiências agroflorestais na Amazônia Brasileira: restrições e oportunidades*. Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adybiblioteca=vazioybusca=\(autor:%%22LUTZ,%20E.%%22\)](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adybiblioteca=vazioybusca=(autor:%%22LUTZ,%20E.%%22))
- Songwe, N.C., Fasehun, F.E. y Okali, D.U.U. (1988). Litterfall and productivity in a tropical rain forest, southern Bankundu forest, Cameroon. *Journal Tropical Ecology*. 4, 25-37. <https://doi.org/10.1017/S0266467400002467>
- Souza, J. A. y Davide, A. C. (2001). Deposição de serrapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. *Cerne*, 7(1), 101-113. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74470109>
- Tao, Y.; Gu, W.; Chen, J.; Tao, J.; Yj, X. y Zhang, H. (2012). The influence of land use practices on earthworm communities in saline agriculture soils of the west Coast Region of China's Bohai Bay. *Plant Soil and Environment*. 59, 8–13. <https://doi.org/10.17221/374/2012-PSE>
- Timoteo, K.; Remuzgo, J.; Valdivia, L., Sales, F.; García, D., Abanto, C. (2016). Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. *Folia amazónica*. 25 (1). 45 – 54. <https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/foliaamazonica/article/view/382>
- Tisdall, J. M. y J. M. Oades. (1982). Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Journal of Soil Science*. 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- United Nations Environment Programme (1992). *Los gases que producen el efecto invernadero*. Sánchez – Vélez y Geròn D. traductores. Universidad Autónoma de Chapingo. México UNEP. <https://www.tdx.cat/bitstream/10803/9637/2/heli.pdf.txt>
- Valenzuela, T. (2001). *Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de Oyamel (Abies religiosa) en el sur del Distrito Federal*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Chapingo].

- Van Veen, J. A. y P. J. Kuikman. (1990). Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry*, 11, 213-233. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00004497>
- Vara, J. (2016). *Evaluación de la aptitud de los suelos para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en la comunidad El Rocano del Cantón Arenillas de la provincia de El Oro* [Tesis de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/6934>
- Vargas, R. (Ed.). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d142b3a14a049/content>
- Vargas, Y.; Viera, W.; Díaz, A.; Tinoco, L.; Macas, J.; Caicedo, C.; Almeida, M. y Vásquez-Castillo, W. (2022). Contribution of agroforestry systems in the cultivation of naranjilla (*Solanum quitoense*) grown in the Amazon Region of Ecuador. *Applied Sciences*, 12(20), 10637. <https://doi.org/10.3390/app122010637>
- Vargas, T. Y. B.; Pico, J. T.; Díaz, A.; Sotomayor Akopyan, D.A.; Burbano, A.; Caicedo, C.; Paredes Andrade, N.; Congo, C.; Tinoco, L.A.; Bastidas, S. (2020). *Manual del Cultivo de Pitahaya para la Amazonía Ecuatoriana*; INIAP, Estación Experimental Central de la Amazonía, Programa Nacional de Fruticultura. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5551>
- Vergara, N. T. (1985). Sistemas agrofloreales: una cartilla. *Unasylva*, 37(147). <https://www.fao.org/4/r1340s/r1340s05.htm#sistemas>
- Vital, A. R. T.; Guerrini, I. A. Franken, W. K. Fonseca y R. C. B. (2004). Produção de Serapilheira e Ciclagem de Nutrientes de Uma Floresta Estacional Semidecidual em Zona Ripária. Sociedade Brasileira de Investigações Florestais. *Revista Árvore*, 28(6), 793-800. <https://www.scielo.br/j/rarv/a/4cFKKcWnFt5vdXVtw3z5GQQ/>
- Werneck, M. S., Pedralli, G. y Gieseke, L. F. (2001). Produção de serrapilheira em três trechos de uma floresta semidecidual com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica de Tripuí, Ouro Preto, MG. *Revista Brasileira de Botânica*. 24, 195-198. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042001000200009>
- Woda, C. (2009). Indicadores para serviços ambientais em sistemas agrofloreais: um estudo de caso no nordeste paraense. In: PORRO, R. (Ed.). *Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação*. Embrapa, <https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00083290.pdf>

- Zhang, H. y Schrader, S. (1993). Earthworm effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates. *Biology and Fertility of Soils*, 15, 229–234. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00361617>
- Zavala, J. (2015). *Influencia de la edad del cultivo del (cacao) Theobroma cacao L, bajo sistemas agroforestales en la captura y almacenamiento del carbono en Tingo María*, [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Federico Villareal].
- Zavala, J., Zavala, S. y Mansilla, L. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Revista de Investigación y Amazonía*, 8(5), 1-8. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200>.
- Zavala, J. y Vega, L. (2021). *Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María*. [Tesis de maestría, Universidad Hermilio Valdizan]. Repositorio digital UNHEVAL. <https://www.unheval.edu.pe/portal/wp-content/uploads/2021/10/Zavala-Vega.-2021.pdf>

VIII. ANEXOS

1. PANEL FOTOGRAFICO



Figura 9. Toma de medida de la circunferencia del tallo de cacao



Figura 10. Medición de la circunferencia (altura de pecho) en especies forestales



Figura 11. Evaluación de plantas herbáceas del agroecosistema del cacao



Figura 12 Evaluación de hojarasca del agroecosistema del cacao



Figura 13. Apertura de calicata en los transectos para el muestreo de suelo



Figura 14. Evaluación del color del suelo desde 0 cm a 30 cm de profundidad



Figura 15. Evaluación del número de lombrices/unidad de muestreo



Figura 16. Evaluación de la densidad del suelo de las unidades fisiográficas

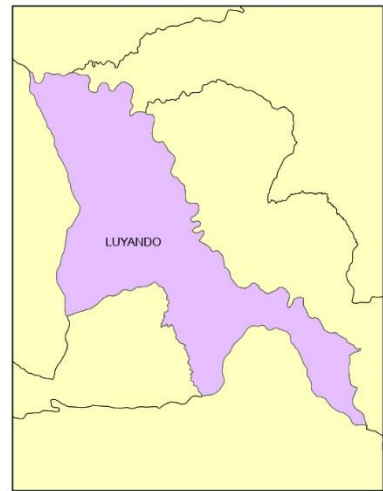
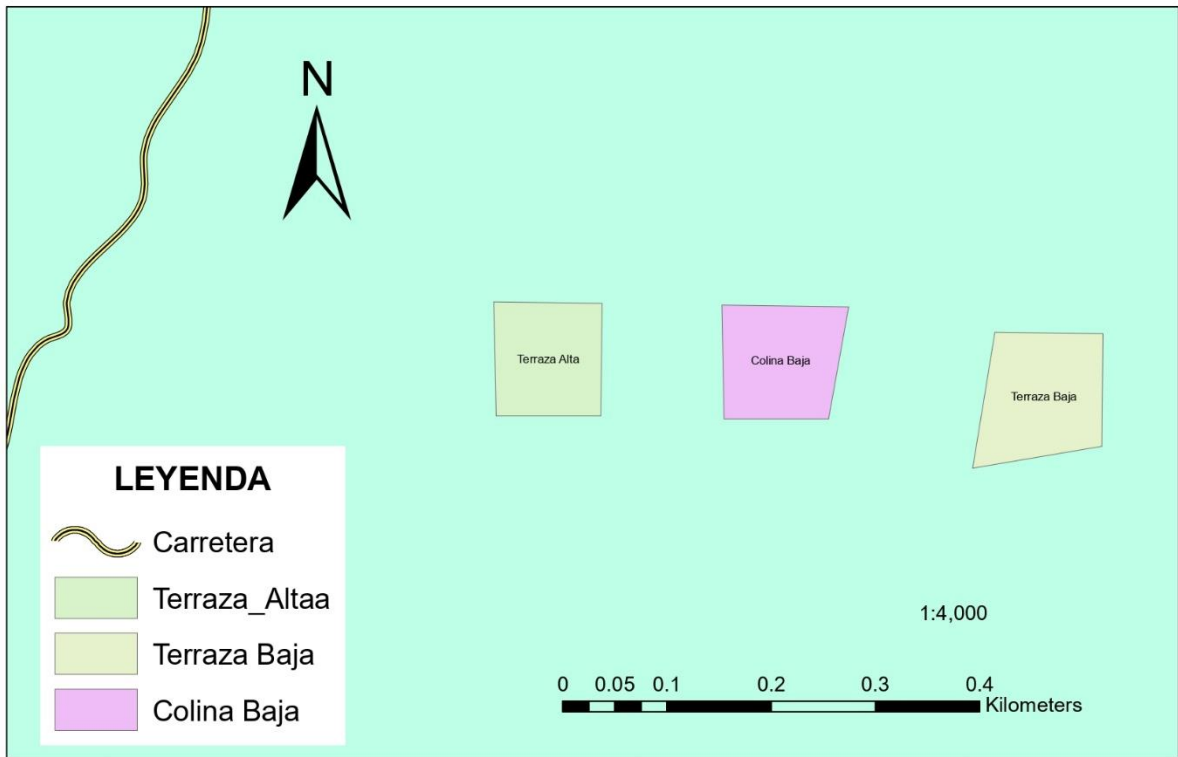


Figura 17. Toma de datos mediante identificación de los SAF



Figura 18. Avistamiento del complejo ecosistémico del cultivo de cacao con su entorno

2. MAPA DE UBICACION GEOGRAFICA




	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			LAMINA 4
	"CONTENIDO DE CARBONO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN <i>Theobroma cacao</i> (CACAO) DE TRES UNIDADES FISIOGRAFICAS EN EL DISTRITO DE LUYANDO-HUANUCO"			
MAPA DE UBICACIÓN DE LAS UNIDADES FISIOGRAFICAS	DISTRITO , PROVINCIA: LUYANDO, LEONCIO PRADO		DEPARTAMENTO: HUANUCO	
	SISTEM DE REFERENCIA: UTM-WGS 84 ZONA 18S	ESCALA: 1:4000	FECHA: Feb-26	

Figura 19. Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de Terraza alta (Ta), Terraza baja (Tb) y Colina baja (Cb)