

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN RECURSOS
NATURALES RENOVABLES



STOCK DE CARBONO ORGÁNICO EN SISTEMAS AGROFORESTAL
DE CAFÉ (*Coffea arábica* L.) Y CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN EL
DISTRITO DE SORITOR

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
MENCIÓN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

ROBERT GUZMAN TRIGOSO

Tingo María – Perú, 2024



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°087-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 4 de abril de 2024, a horas 2:15 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos Y agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“STOCK DE CARBONO ORGANICO EN SISTEMAS AGROFORESTAL DE CAFÉ (*Coffea arabica* L) Y CACAO (*Teobroma cacao* L.) EN EL DISTRITO DE SORITOR”,

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

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

Tingo María, 13 de agosto de 2024


Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRESIDENTE


Ing. JAIME TORRES GARCIA
MIEMBRO


Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
MIEMBRO




Dr. JOSE D. LEVANO CRISOSTOMO
ASESOR



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 279 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación 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% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

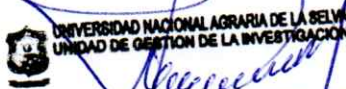
Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
STOCK DE CARBONO ORGÁNICO EN SISTEMAS AGROFORESTAL DE CAFÉ (<i>Coffea arábica</i> L.) Y CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.) EN EL DISTRITO DE SORITOR	ROBERT GUZMÁN TRIGOSO	22 % Veintidós

Tingo María, 23 de setiembre de 2024



Dr. Tomas Menacho Matiqui
JEFE

C.C. Archivo



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN OFICINA DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE Y TESISISTA

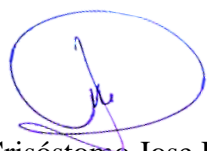
(Resol. 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos generales de Pregrado

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Recursos Naturales Renovables
Título de tesis	: Stock de carbono orgánico en sistemas agroforestal de café (<i>Coffea arábica</i> L.) y cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en el distrito de Soritor
Autor	: Guzmán Trigoso Robert
Asesor de tesis	: Ing. M.Sc. Lévano Crisóstomo Jose Dolores
Escuela Profesional	: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
Programa de investigación	: Manejo y Conservación de Suelos
Línea(s) de investigación	: Evaluación de parámetros físico químicos y biológicos
Eje temático de investigación	: Agroforestería comunitario
Lugar de ejecución	: Distrito Soritor - Moyobamba
Duración	: Inicio : 03 – 05 – 2022 Término : 30 – 10 – 2023
Financiamiento	: FEDU : 0 soles Propio : 2 525 soles Otros : 1 846, 00 soles

Tingo María, Perú, enero 2024


Bach. Guzman Trigoso RObert
Tesisista


Mag. Lévano Crisóstomo Jose Dolores
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN

DEDICATORIA

Padre Celestial ahora me doy cuenta que si no conseguí todo lo que quise fue porque tú tenías preparado un mejor camino para mí. Siento una enorme gratitud porque me has dado más de lo que imaginé

Mis queridos padres Walter Guzman y Silvia Trigoso, les doy gracias por todo lo que incondicionalmente me han brindado. Yo sé que el cuidado y educación de un niño no es cosa de juego, se requiere de mucha responsabilidad, la cual ustedes me han sabido inculcar con su ejemplo

A mi hermano: Freddy Guzmán, porque siempre he contado con ellos, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido; por el apoyo y la amistad.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Recursos Naturales Renovables que contribuyó en mi formación profesional.
- A los miembros integrantes del jurado de tesis: Dr. Manrique de Lara Suarez, Lucio; Ing. Torres García Jaime; Ing. Mg. Alva Valdiviezo, Wilfredo; Ing. MSc. Rengifo Trigozo, Juan Pablo.
- Al Ing. M.Sc. Lévano Crisóstomo, José, docente de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, asesor del presente trabajo, por su labor como formador, su amistad, su apoyo desinteresado y supervisión de la presente tesis.
- A todas aquellas personas que en forma directa o indirecta colaboraron en la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivo general.....	4
1.2. Objetivo específicos.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Los sistemas agroforestales (SAF)	5
2.1.1. Los SAF como contenedores de carbono	6
2.1.2. Parámetros técnicos de las instalaciones de almacenamiento de carbón	8
2.2. Suelos	8
2.3. Carbono (C)	9
2.4. Dióxido de carbono (CO ₂)	9
2.5. Almacenamiento de carbono	10
2.6. Almacenes de carbono	11
2.7. Monitoreo del almacenamiento de carbono.....	11
2.8. Antecedentes del estudio	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Lugar de ejecución.....	14
3.1.1. Ubicación política.....	14
3.1.2. Características del área de estudio.....	14
3.2. Materiales, insumos y equipos.....	14
3.2.1. Materiales de campo.....	14
3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio	15
3.3. Metodología.....	15
3.3.1. Tipo de investigación	15
3.3.2. Variables independientes.....	15
3.3.3. Variables dependientes.....	15
3.3.4. Actividades ejecutadas	15
3.3.5. Método de análisis de datos.....	25
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Stock de carbono orgánico.....	27
4.1.1. Biomasa aérea.....	27
4.1.2. Biomasa arbustiva	29

4.1.3. Necromasa	31
4.1.4. Hojarasca	33
4.1.5. Suelo	34
4.1.6. raíces finas	36
4.2. Carbono orgánico total	37
V. CONCLUSIONES	39
VI. PROPUESTAS A FUTURO	40
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Prueba de normalidad de datos de cantidad de carbono orgánico almacenado en la biomasa aérea.....	27
2. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea.....	28
3. Datos de carbono orgánico almacenado en biomasa arbustiva en sistemas agroforestales según la prueba de normalidad.....	29
4. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa arbustiva.....	30
5. Datos de carbono almacenado en la necromasa según Prueba de normalidad.....	31
6. Prueba t-student del carbono orgánico en la necromasa.....	32
7. Datos de carbono orgánico almacenado en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad.....	33
8. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea.....	34
9. Datos de carbono orgánico almacenado en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad.....	34
10. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea.....	35
11. Datos de carbono orgánico almacenado en raíces finas de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad.....	36
12. Prueba t-student del carbono en la biomasa arbustiva.....	37
13. Prueba t-student para muestras independientes para el carbono orgánico total.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diseño de la ubicación de muestreo de las parcelas de café y cacao	16
2. Toma de las sub-muestras de suelos en las parcelas de muestreo	17
3. Metodología para la obtención de submuestras de suelos en las parcelas de muestreo	18
4. Puntos para obtención de submuestras de hojarasca	19
5. Puntos para obtención de submuestras de raíces finas	20
6. Estimación de la longitud de circunferencia (Lc) del árbol a 30 cm del suelo.....	20
7. Ejemplo para la determinación de las sub parcelas de muestreo al azar	23
8. Histograma de frecuencia relativa de cantidad de carbono orgánico almacenado en biomasa aérea de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B).....	27
9. Histograma de frecuencia relativa para el almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa arbustiva de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)	30
10. Histograma de frecuencia de carbono orgánico almacenado en la necromasa.....	31
11. Histograma de frecuencia relativa de almacenamiento de carbono orgánico en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)	33
12. Histograma de frecuencia relativa de almacenamiento de carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)	35
13. Histograma de frecuencia relativa de carbono almacenado en raíces finas de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B).....	36
14. Instalación de panel de tesis en la parcela de estudio.....	46
15. Muestreo de hojarasca en parcela con sistema agroforestal de cacao	46
16. Muestreo de suelo en parcela con sistema agroforestal de cacao	47
17. Muestreo de suelo en parcela con sistema agroforestal de cacao.....	47
18. Muestreo de densidad aparente del suelo en parcela con sistema agroforestal de caca.....	48
19. Extracción de muestras de suelo.....	48
20. Muestreo de necromasa en parcela agroforestal de cacao	49

RESUMEN

Los gases de efecto invernadero en la actualidad presentan altas concentraciones repercutiendo en acelerar el calentamiento global. Es por ello, que se planteó como objetivo evaluar el almacenamiento de carbono orgánico a través de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.). Para ello se empleó las metodologías propuestas por Andrade *et al.* (2008) para el uso de la ecuación logarítmica para la estimación del carbono en las hojarasca, hojas y las ramas secas, además se colocó un marco de 50 x 50 cm para el muestreo en cada celda. Los resultados encontrados fueron que el sistema agroforestal de cacao almacena 25,27 tC/ha de carbono orgánico en la fracción de la biomasa aérea, 2,08 tC/ha en la biomasa arbustiva, 2,90 tC/ha en necromasa, 2,94 tC/ha en la hojarasca, 42,50 tC/ha en el suelo y 6,41 tC/ha en las raíces finas, mientras que en el sistema agroforestal de café almacenó 19,57 tC/ha de biomasa aérea, 1,23 tC/ha en la biomasa arbustiva, 1,64 tC/ha en la necromasa, 2,99 tC/ha en la hojarasca, 41,14 tC/ha en el suelo, 7,12 tC/ha en las raíces finas. Concluyéndose que existió evidencia estadística significativa en el sistema agroforestal de cacao y almacenando mayor carbono que el sistema agroforestal de café.

Palabras claves: Stock, carbono, orgánico, sistemas, agroforestal

ABSTRACT

Greenhouse gases are currently present in high concentrations, which have an impact on accelerating global warming. For this reason, the objective was to evaluate the storage of organic carbon through agroforestry systems of coffee (*Coffea arabica* L.) and cocoa (*Theobroma cacao* L.). To do so, the methodologies proposed by Andrade et al. (2008) were used for the use of the logarithmic equation for estimating carbon in leaf litter, leaves and dry branches. In addition, a 50 x 50 cm frame was placed for sampling in each cell. The results found were that the cocoa agroforestry system stores 25,27 tC/ha of organic carbon in the aboveground biomass fraction, 2,08 tC/ha in the shrub biomass, 2,90 tC/ha in necromass, 2,94 tC/ha in the leaf litter, 42,50 tC/ha in the soil and 6,41 tC/ha in the fine roots, while the coffee agroforestry system stored 19,57 tC/ha of aboveground biomass, 1,23 tC/ha in the shrub biomass, 1,64 tC/ha in necromass, 2,99 tC/ha in the leaf litter, 41,14 tC/ha in the soil, 7,12 tC/ha in the fine roots. It was concluded that there was significant statistical evidence in the cocoa agroforestry system and storing more carbon than the coffee agroforestry system.

Keywords: Production, litter, systems, use, properties, chemicals, soil.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el dióxido de carbono conocido como CO₂ es considerado uno de los principales gases que contribuyen al calentamiento global, ante ello, acciones ambientales planteadas para su remediación es su almacenamiento en forma de biomasa, acción que se realiza a través de la actividad de la fotosíntesis de especies vegetales en el suelo, acumulando materia orgánica. Los arreglos forestales como los sistemas agroforestales son sumideros importantes que absorben el CO₂ y liberan oxígeno.

En los diversos foros ambientales, se han planteado que en un corto plazo, aquellas actividades antropogénicas, relacionadas con la sostenibilidad del suelo, respecto al cambio o conflicto de uso de la tierra, actividades agroforestales, juegan un rol imprescindible en reducir el CO₂ de la atmosfera. Asimismo, se considera el almacenamiento o fijación de carbono orgánico (materia orgánica) en el suelo como una alternativa mecánica primordial para mitigar el impacto y los efectos del cambio climático, puesto que, el suelo además de servir como almacenamiento es un reservorio estabilizador de carbono. Es preciso tener en claro que además del suelo, existen factores ambientales como la precipitación, clima y la altitud que influyen directamente sobre la cuantificación de carbono orgánico fijado en el suelo.

La fijación de carbono como servicio ecosistémico han sido direccionados como mediciones estadísticas de alto grado de confiabilidad, sin embargo a ocasionado que en el ámbito local existan conocimientos escasos respecto a la metodología de mediciones sencillas, generando dificultades a los agricultores para el acceso a los mercados de carbono, principalmente generado por las escasas investigaciones y su poca difusión como alternativa en los manejos de sistemas agroforestales enfocados a la sostenibilidad de los recursos. Lo que acabamos de mencionar son un conjunto de vulnerabilidades socioeconómicas de los agricultores que limitan a la expansión agrícola sin el perjuicio de los bosques.

El manejo de sistemas agroforestales bajo sombra arbórea es de gran complejidad en el distrito de Soritor, existiendo un gran potencial para manejar y recuperar extensiones de suelos degradados. En este caso, incentivos económicos adicional a los beneficios ambientales, los agricultores podrían beneficiarse de los bonos por captura de carbono a través de la fijación en los arreglos agroforestales de cultivos de cacao y café, contribuyendo así un valor agregado en el manejo de sistemas agroforestales acorde con la sostenibilidad del mismo.

La presente investigación generó cuantitativamente valores respecto a la cuantía de carbono fijado en arreglos de sistema agroforestales de café y cacao, con la finalidad de generar una nueva alternativa a los productores. Concluyéndose que los sistemas agroforestales de cacao y café almacenan estadísticamente las mismas cantidades de carbono en las fracciones Suelo, raíces finas, necromasa y hojarasca.

1.1. Objetivo general

Evaluar el almacenamiento de carbono orgánico a través de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.).

1.2. Objetivo específicos

- Determinar el carbono fijado en la fracción biomasa aérea (herbáceo, arbóreo, necromasa y hojarasca) y la fracción bajo la superficie del suelo (raíces finas y suelo).
- Comparar los sistemas agroforestales de café y cacao respecto al mayor potencial de fijación de carbono.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Los sistemas agroforestales (SAF)

El dar un uso sostenible a la tierra, existiendo la interacción biológica de especies leñosas de características perennes con cultivos y animales se entiende por sistemas agroforestales (SAF). El objetivo fundamental de los SAF es la multiplicidad y optimización de producción bajo los lineamientos de la sostenibilidad (Lamprecht, 1990).

La agroforestería es importante para preservar la biodiversidad de paisajes afectados por la deforestación, proporcionando hábitats y recursos para especies animales y vegetales; preservación del vínculo paisajístico, situaciones de vida menos severas del paisaje para las poblaciones de los bosques, reducir la frecuencia y rigor de los incendios, posiblemente reducir el efecto de los impactos sobre los ecosistemas (Albrecht y Kandji, 2003).

Utiliza una metodología muy compleja que permite la interacción de la silvicultura, agronomía y mejoramiento genético con la finalidad de permitir un control adecuado del conjunto y la interdependencia de cada uno de sus elementos (Callo, 2001).

Los tres componentes principales de la agroforestería, leñosas perennes (árboles), agrícolas, plantas y animales (estrecho), precisan según la naturaleza y presencia de estos componentes las siguientes categorías: Sistemas agroforestales: consisten en alternancia de árboles y cultivos estacionales (anuales o perennes). Silvopastoriles: consisten en alternancia de árboles y pastizales para sustentar al ganado. Agrosilvopastoriles: consisten en alternancia de árboles, cultivos estacionales y pastizales para sustentar al ganado.

Los objetivos de la agrosilvicultura son: diversificar la producción; mejorar el movimiento; aumentar la cantidad de material orgánico en los estratos del suelo, fija el nitrógeno atmosférico, reciclar alimentos; generar eficientemente una diversidad de microclimas; optimizar la productividad del cultivo agroforestal y/u otro siguiendo el concepto de producción sostenible. Se fundamenta en principios y prácticas agrícolas basadas en mecanismos variables y flexibles, de acuerdo con los objetivos y la planificación previstos, permitiendo a los sistemas diversificar la producción en las fincas o terreno mediante la obtención de madera, leña, frutos, plantas medicinales, forrajes. de forma asociativa y con otros productos agrícolas (Lamprecht, 1990).

2.1.1. Los SAF como contenedores de carbono

Básicamente, la efectividad del secuestro de carbono de cualquier arreglo o ecosistema terrestre es coaccionado principalmente de dos factores: la extensión total de estos ecosistemas y la cantidad de especies vegetales (árboles) por unidad de área. Los SAF consiguen almacenar sumideros de carbono significativamente grandes y, existen casos que se asemejan a los sumideros de carbono que se encuentran en los bosques secundarios. La cantidad de carbono acumulado en el suelo también aumenta en los SAF (Chave et al., 2005).

Moguel y Toledo (1998) menciona que los SAF pueden almacenar o estabilizar el CO₂ emitido por tres maneras: 1) secuestrando dióxido de carbono en las plantas y almacenando el carbono y nitrógeno de la vegetación perenne en el suelo a largo plazo, 2) proporcionando alimentos y fibra para ayudar a minimizar la deforestación y la degradación de la tierra, y 3) para la producción continua de leña, ayudando a minimizar el uso de combustibles fósiles.

Brown y Lugo (1992) manifiestan que de los 700 millones de tierras globales y los 245 millones de hectáreas (Mha) pueden estar disponibles para el almacenamiento y secuestro de carbono en plantaciones y agrosilvicultura. Sin embargo, factores económicos, sociales, culturales e institucionales que influyen en el uso de la tierra son quienes ejercen la disponibilidad real de tierra para estos programas (Moguel y Toledo, 1998).

Nair (1993) señala que los SAF se especifican contextualmente como tierra donde se manipulan sistemas utilizando y manejando especies de árboles perennes junto con cultivos y animales, donde los componentes resultantes de una disposición espacial y temporal interactúan ecológica y económicamente. Los SAF también son substanciales depósitos de carbono en el tiempo, sin embargo dependen significativamente de factores como la productividad, el propósito de su diseño y las condiciones ambientales en las que se desarrollan, además de ser fuente de alimento para agricultores y como fuente de energía para los animales. La acumulación de carbono (C) ligado directamente a la biomasa de árboles y arbustos; La cantidad de C contenida en el componente de la biomasa depende de la proporción de especies vegetales existentes y de su tamaño (Cambardella y Elliott, 1992).

Young (1997) indica que la producción de biomasa terrestre varía significativamente entre 2,3 - 48 tC/ha en diferentes SAF y regiones ecológicas, dependiendo

del número de especies vegetales, la estratificación y organización espacial y temporal. La producción de biomasa subterránea puede variar desde 1 a 4,5 tC/ha.

Aquellos factores principales que influyen en la acumulación de la materia orgánica del suelo (MOS) y su hábitat son la vegetación, la hojarasca, la composición química de los materiales, los factores climáticos (temperatura y humedad) y las características del suelo, como la estructura, contenido de arcilla y mineralogía y grado de acidez (Stevenson, 1994). En SAF generalmente se almacenan en promedio de 9, 21, 50 y 63 tC/ha.año, en las fracciones de biomasa aérea y en raíces de regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, y de manera significativa en todos los almacenes se estima en 12-228 tC/ha.año de carbono orgánico almacenado en el suelo (Schroeder, 1994).

Oelbermann *et al.* (2004) refieren que el almacenamiento de carbono orgánico en los SAF, obtuvieron el potencial de almacenamiento de C de la biomasa viva en las regiones tropicales es de $2,1 \times 10^9$ tC/ha.año, sin embargo para regiones templadas los valores o cantidades promedios fluctúan de $1,9 \times 10^9$ tC/ha.año.

Rajagopal (2004) menciona que en la ciudad de Tlapacoyan, Veracruz, evaluó la cantidad de C en SAF de cítricos en diferentes arreglos espaciales y componentes, sus resultados manifestaron que los arreglos agroforestales constituidos por cítricos + café + plátano, cítricos + café, cítricos + pasto y cítricos + plátano almacenaron 196, 186, 181 y 144 tC/ha.año. De ello, el contenido de C de la biomasa aérea varió entre 41 y 75 tC/ha.año, el mayor almacenamiento de carbono se halló en los árboles, siendo cinco veces mayor que el C registrado en arbustos y pastos. La variabilidad de carbono se atribuyó al tipo de especie arbórea, la densidad, las prácticas de manejo y la edad de los sistemas.

Balbontín *et al.* (2009) señala que al realizar evaluaciones sobre captura de carbono en diferentes grupos climáticos en México, reportó que la cantidad de carbono almacenado varía entre 34,75 tC/ha.año de un clima muy seco respecto a un clima tropical húmedo con lluvias todo el año con 168,79 tC/ha.año.

Callo (2001) encontró que la fracción suelo hubo mayor cantidad de carbono orgánico, precisamente en huertos familiares, café de sombra y silvopastoril, se

mantuvieron en 196, 193 y 120 tC/ha.año, de las cuales más del 58 % fue en el suelo. Finalmente concluyó que los árboles son una importante reserva de agua incluso a 30 % C.

2.1.2. Parámetros técnicos de las instalaciones de almacenamiento de carbón

2.1.2.1. Biomasa aérea

La biomasa aérea es la composición de árboles, vegetación herbácea y arbustos. La composición de estos componentes es en proporciones apropiadas para cada especie de planta. Es preciso señalar que el componente principal de esta fuente son los árboles. En los experimentos de Solar Foundation, las malezas tienen una contribución muy pequeña al establecimiento, pueden dejar de tomar muestras. Sin embargo las decisiones la toma el equipo técnico encargo de realizar el monitoreo, pero como recomendación, no es necesario probar este componente a menos que el sistema que se está evaluando contenga un fuerte componente herbáceo (Fundación Solar, 2000).

2.1.2.2. Biomasa subterránea

La biomasa subterránea se refiere al componente constituido por las raíces de la vegetación del ecosistema en estudio. Una de las metodologías prácticas y sencillas consiste en hacer una estimación conservadora de este valor basándose en los valores existentes o calcular el porcentaje de biomasa aérea. Sin embargo, existen 13 metodologías con las que se puede medir (Fundación Solar, 2000).

2.2. Suelos

Los suelos suelen ser grandes sumideros de carbono orgánico e inorgánico. El carbono edáfico se puede determinar eficazmente utilizando muestras compuestas que representan múltiples curvas. Todo esto contribuye a reducir costos y permite realizar estimaciones razonables (Macdicken, 1997). No existe ningún convenio internacional sobre metodologías para monitorear los cambios de carbono en el suelo. El almacenamiento de carbono en el suelo está directamente en función de la densidad aparente, que depende de otros parámetros como la precipitación, la disolución y la tasa de translocación. Sin embargo, la variabilidad del carbono orgánico del suelo debe medirse en toda el área del proyecto, a una profundidad de 30 cm, esto a causa del efecto antropogénico regido por el cambio de uso del suelo tiene el mayor efecto en las capas superiores (IPCC, 2000).

2.3. Carbono (C)

Uno de los elementos químicos básicos que circula por los océanos, el suelo, sub suelo y la atmosfera es el carbono. Y estos son considerados como depositicos que almacenan carbono. Todo ello está relacionado con la sostenibilidad de sistemas agrícolas y afecta las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento continuo de los cultivos. El carbono orgánico a granel se localiza a través de material orgánico sutilmente modificado de plantas, animales y microorganismos, en forma de humus y en forma muy condensada con una constitución cercana al carbono elemental (Martinez *et al.*, 2008).

2.4. Dióxido de carbono (CO₂)

Uno de los gases que contribuye a acelerar el efecto invernadero y propiamente al calentamiento global es el dióxido de carbono (CO₂). La concentración de este gas aumentó de 280 ppm en 1750 a 360 ppm al 2000, asimismo, el incremento desmedido del uso de combustibles fósiles es hoy responsable del 80-85% de las emisiones de dióxido de carbono (Gómez-Echeverri, 2000). La fotosíntesis es una de las formas que conlleva a mitigar el calentamiento global y sus efectos almacenándolo en forma de biomasa, así como en el suelo (acumulación de materia orgánica). En la actualidad, los sistemas agroforestales (SAF) son importantes sumideros de carbono (Andrade, 2000).

El planeta tierra en la actualidad sufre el cambio climático global siendo este uno de los problemas ambientales más importantes causado por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases causan el cambio climático y son aquellos que actúan como gases de efecto invernadero (GEI) (Ramachandran, 1993).

Una de las metodologías utilizadas para mitigar los problemas del dióxido de carbono, además de disminuir las emisiones, es "rastrearlo", es decir, atrapararlo y preservarlo durante un tiempo por décadas en la biomasa, el suelo y los océanos. En primer lugar; Esto se consigue mediante la fotosíntesis y, por otro lado, la transformación y mineralización de la materia orgánica. Los bosques son los principales sumideros de dióxido de carbono, pero según algunos estudios, la capacidad de absorción y almacenamiento de carbono de los bosques varía, principalmente debido a los siguientes factores: temperatura, precipitación, densidad aparente, tipo de suelo, pendiente, altitud, condiciones topográficas, crecimientos y edad (Albrecht-Kandji, 2003).

Senayake y Gamboa (2003) refieren que el carbono es un hecho vivo en la naturaleza y por tanto una parte viva de la biosfera, Por su comportamiento el carbono presenta un ciclo que gira en unos 10 mil años. Consistiendo en un comportamiento del cual los árboles crecen, secuestran carbono, luego mueren y devuelven el carbono a la atmósfera.

Jandl (2003) informa que las tierras forestales son el mayor depósito de carbono en los ecosistemas. Albergan cuatro veces más carbono que la vegetación. Por tanto, merecen atención en la búsqueda de mecanismos de almacenamiento de carbono. El aumento de los niveles de carbono en el suelo puede ser considerado como un servicio ambiental.

Los bosques almacenan cantidades significativas de carbono tanto a nivel de vegetación como de suelo, desempeñando así un papel importante. en el intercambio de dióxido de carbono entre la biosfera y la atmósfera. Estos ecosistemas actúan como sumideros cuando fijan dióxido de carbono y lo transforman en carbohidratos (mediante la fotosíntesis) o como fuentes de emisión de dióxido de carbono cuando se libera a la atmósfera mediante combustión (Chavez *et al.*, 2005).

En el suelo, el carbono orgánico encuentra en la hojarasca, en los sistemas de raíces vivas y muertas y en el "carbono negro". Las moléculas orgánicas se mineralizan en una media de cuatro años. Algunos son muy tercos y tienen bajas tasas de mineralización. La edad de esta parte de materia orgánica unida a óxidos y arcillas varía desde unos pocos cientos hasta miles de años. Es necesario comprender los principales procesos del suelo y su relación con otros factores como la temperatura, la humedad del suelo y los nutrientes, especialmente el nitrógeno (Chávez *et al.*, 2005).

2.5. Almacenamiento de carbono

La comparación del almacenamiento de carbono con el suelo muestra que el almacenamiento de carbono está influenciado por varios factores: edad de las especies, estructura del suelo, cambio de uso de la tierra, manejo de cultivos, entre otros. Fragoso y Lavelle (1998) menciona que un estudio sobre la cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema cafetalero de Guatemala encontró valores similares al nuestro, con cantidades de C orgánico en el suelo que oscilan entre 47,18 y 67,60 tC/ha, a diferentes altitudes y depósitos de C, el aumento del suelo es visible al aumentar la altitud.

2.6. Almacenes de carbono

El efecto de un proyecto de almacenamiento de carbono debe estimarse como la diferencia en la cantidad de carbono almacenado durante un período de tiempo con y sin el proyecto (línea de base). Para proyectos agroforestales, el caso de referencia es el sistema de uso de la tierra existente (Powell y Delaney, 1998). Macdiken (1997) señala que las reservas de carbono son una visión cuantitativa del estado actual de cada componente de carbono (biomasa, hojarasca, raíces y suelo). Esta metodología debería permitir comparaciones entre sitios, sistemas y períodos de tiempo y depende de la relación costo-beneficio. Macdiken (1997) afirma que la alta variabilidad regional de los sistemas agroforestales hace que el muestreo estratificado sea más conveniente. Todo el sistema debe dividirse en capas (vegetación, suelo o topografía), que pueden determinarse mediante imágenes de satélite, fotografías aéreas y mapas de vegetación, suelo o topografía.

2.7. Monitoreo del almacenamiento de carbono

Para monitorear la fijación de carbono en sistemas forestales, los cultivos agrícolas de naturaleza llamados parcelas permanentes (PPM) es una metodología estadística muy trascendental para evaluar los cambios temporales, especialmente porque proporcionan información más real y fácil de controlar sobre el crecimiento forestal (Macdiken, 1997).

Los cambios transitorios en el stock de carbono en PPM alcanzan considerarse flujos de carbono. El mismo autor considera que las particulares de los PPM (forma, tamaño y número) componen un aspecto clave del seguimiento. La forma de las parcelas obedece íntegramente de la repartición espacial de los árboles. En plantaciones lineales se deben utilizar parcelas de la misma forma; mientras que los árboles están distribuidos aleatoriamente (dispersos), la forma preferida es redonda; Se recomienda PPM rectangular para sistemas con un árbol de distribución del sistema (Cambardella y Elliott, 1992).

2.8. Antecedentes del estudio

FAO (1999) señala que los bosques exigen un papel significativo en el control del flujo neto de gases de efecto invernadero entre la atmósfera y la tierra. Los ecosistemas considerados como bosques funcionan como reservorios y almacenan carbono en la biomasa y el suelo. Intervienen albergando carbono cuando acrecienta su superficie o productividad, lo que aumenta la absorción de carbono de la atmósfera. Por el contrario, proceden como principio de gases de efecto invernadero cuando la quema y descomposición de la biomasa y los cambios

en el suelo provocan la emisión de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Actualmente, alrededor del 20 % de las emisiones de dióxido de carbono causadas por el hombre en el mundo son causadas por el cambio de uso de la tierra, y especialmente por la deforestación, suscitada principalmente en los trópicos.

Gayoso (2006) muestra que la cuantía de carbono almacenado por unidad de área varía mucho dependiendo del arquetipo y condición del ecosistema del bosque. Se forman bosques maduros siempre verdes, donde la cantidad total de dióxido de carbono es de 606,80 tC/ha distribuidos de la siguiente manera: del aire en biomasa 283,75 tC/ha, 79,92 tC/ha en raíces (diámetro >5 mm), 2,79 tC/ha en sustrato, 53,56 tC/ha en necromasa, cobertura foliar 5,87 tC/ha, y en los primeros 30 cm de suelo 180,91 tC/ha. El carbono fijado al suelo supera las 140 tC/ha en todos los casos investigados, si se consideran los primeros 30 cm de profundidad del suelo, pues si bien se halla materia orgánica hasta los 120 cm, se estima que estos 30 cm no es importante. El suelo, la vegetación y el mantillo son las reservas de carbono más importantes en los ecosistemas forestales. La encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico a través de la fotosíntesis es la vegetación. Los bosques de naturaleza templados y tropicales secuestran y almacenan en mayor cantidad carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y representan el 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo.

Segura y Kannisen (2002) señalan que los ecosistemas forestales y agroforestales (SAF) suelen actuar para el almacenamiento de carbono, llegando a estimarse un promedio de 95 MgC/ha en las regiones tropicales, para un total de 2,1 mil millones de MgC/año en estas regiones áreas, a pesar de ello, existen pocos estudios que evalúen el carbono en la zona subterránea (raíz y suelo), así como en las fracciones del mantillo y árboles muertos (necromasa) debido a la complejidad de los sistemas (Brown, 1997).

Ávila et al. (2001) encontraron que los sistemas de monocultivo de especies de café en Costa Rica retienen el carbono en un margen promedio de 139 tC/ha. Para un sistema café-eucalipto (4 años) 161 tC/ha. Eucalipto de café (6 años), 184 tC/ha. Para Café poró (más de 10 años) y 153,9 tC/ha para café a pleno sol (0-25 cm). Definitivamente estos resultados están relacionados a las condiciones de cada región debido a la interacción del clima, suelo, tipo de cafeto, mantenimiento, etc.

En seis sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) asociados con diferentes especies forestales de árboles y frutales en el Departamento de San Martín, Perú, se determinaron que los resultados de recuperación de carbono en cada sistema agroforestal varían entre 26,2 tC/ha en el sistema agroforestal Pachiza de 5 años y 45,07 tC/ha en el sistema agroforestal Pachiza de 12 años. De igual forma, la huella de carbono de la biomasa arbórea viva varió de 12,09 tC/ha a 35,5 tC/ha, seguida de la biomasa residual con valores de 4 tC/ha a 9,97 tC/ha, mientras que las biomásas de árboles muertos en pie y de árboles muertos caídos fueron muy variables y bajas. Los sistemas agroforestales de 12 y 20 años representan el 66,7 % de los sistemas con reservas de carbono superiores a 40 tC/ha, mientras que los sistemas de 5 años tienen reservas de carbono inferiores a 30 tC/ha. Los SAF de 5 años en Juanjuí y Pachiza produjeron el mayor flujo de carbono anual, dando el mayor beneficio económico en términos de unidades de carbono equivalente (Chavez *et al.*, 2005).

Palm y Sanchez (1990) realizaron investigaciones en la Reserva Indígena de Talamanca en Costa Rica en sistemas de laurel-cacao rinden entre 43 y 62 tC/ha, el laurel fijó entre el 80 y el 85 % del carbono total de la biomasa. Estos resultados concuerdan con otro estudio en Talamanca, que encontró entre 42 y 61 tC/ha en plantaciones de cacao arboladas en colinas y valles (Chave *et al.*, 2005). Al respecto informaron de una conservación de carbono similar en sistemas agroforestales en tierras bajas húmedas de América del Sur (39-102 tC/ha).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Las actividades de campo para la ejecución de la presente tesis de exploración se efectuó en 20 parcelas agroforestales de cacao y café, concernientes geográficamente al caserío, en el distrito de Soritor. Asimismo, la determinación de indicadores fisicoquímicos del suelo y la tabulación y procesamiento de datos se hicieron en los laboratorios de Análisis de Suelos de la Facultad de Recursos Naturales Renovables y el laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS).

3.1.1. Ubicación política

El distrito de Soritor o la tierra del maní, es uno de los seis distritos que pertenecen a la provincia de Moyobamba, en la región San Martín.

3.1.2. Características del área de estudio

Se sitúa geográficamente a los 06°08'00'' de Latitud Sur y 77°05'30'' de longitud oeste. Su accesibilidad es por medio de una carretera afirmada (carretera Fernando Belaunde Terry). La zona de influencia de las parcelas presentan un clima Subtropical, con temperaturas ambientales con un promedio de 18 a 25 °C, por estar situado en la zona natural de Selva alta o Rupa Rupa, en un Bosque Húmedo Premontano Tropical (Bhpt). Esta zona presenta una humedad relativa encontrada en el rango de 81-84 % durante el mes de marzo, con un mínimo del 80 % para el mes de agosto. La precipitación total presenta un promedio máximo de 1 968 mm, con un mínimo anual de 936 mm, las mismas que se presentan durante todo el año. A pesar de ello, la diferencia entre estaciones de invierno y verano es posible distinguir, siendo los meses de octubre a mayo para épocas de máximas avenidas y los meses de junio a setiembre para la presencia de lluvias moderadas.

3.2. Materiales, insumos y equipos

3.2.1. Materiales de campo

Para el desarrollo del presente estudio se emplearon los siguientes materiales de campo: libretas de campo, wincha y flexómetros, bolsas plásticas, navajas, palana recta, martillo, tubo muestreador, papel periódico, entre otros.

3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio

Para el desarrollo del presente estudio se emplearon los siguientes materiales de laboratorio: Tubo de ensayo, balanza de precisión, varilla, probeta, pipeta, bureta, frasco lavador, gradilla, vaso de precipitados, embudo cónico, matraz de Erlenmeyer, tamiz y estufa.

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo de investigación

Investigación descriptiva.

3.3.2. Variables independientes

- Sistemas agroforestales de cacao.
- Sistemas agroforestales de café.
-

3.3.3. Variables dependientes

Las variables en el presente trabajo de investigación fueron:

- Contenido de carbono orgánico: Biomasa aérea, biomasa arbustiva, necromasa, hojarasca, suelo, raíces finas.

3.3.4. Actividades ejecutadas

3.3.4.1. Identificación de unidades experimentales

Fue necesario crear una red de investigación de 20 sectores forestales cultivables (tres sectores de cacao y tres de café) para muestrear los siguientes componentes: suelo, raíces, necromasa, hojarasca, diámetros y alturas de árboles de cacao y café. Asimismo, se encontró una mayor heterogeneidad de la parcela en función de la estructura vegetal con los siguientes criterios de selección:

- Edad de plantación: las plantaciones agroforestales deberán tener como mínimo cuatro años de instalación y no mayor de ocho años.
- Nivel altitudinal: la ubicación de las parcelas no deberá diferir en un máximo de 50 m.s.n.m.
- Tipo de cobertura: Es preciso que la guaba (*Inga edulis*) se usó como cobertura en todos los sistemas agroforestales en estudio.

3.3.4.2. Toma de muestras

Para la toma de muestras en cada sistema agroforestal seleccionado, se diseñó un arreglo (área de muestreo) de 1 000 m² (50 * 20 m) en el centro de la plantación de cacao, para reducir errores de muestreo por afectación en el borde. El eje del área de muestreo se ubicó geográficamente (Figura 1) y en este punto se trazó una línea de 50 m correspondiente a la línea central larga del área de muestreo. Esta línea se orientó según la forma de cada campo de cacao, perpetuamente siguiendo la orientación del trayecto más larga que se presentó en el campo del sistema agroforestal de cacao (Figura 2). Luego, el área de muestra se dividió en 10 submuestras o celdas de tamaño 10 * 10 m (100 m²) donde se tomaron muestras y se midieron los árboles (Macdiken, 1997).

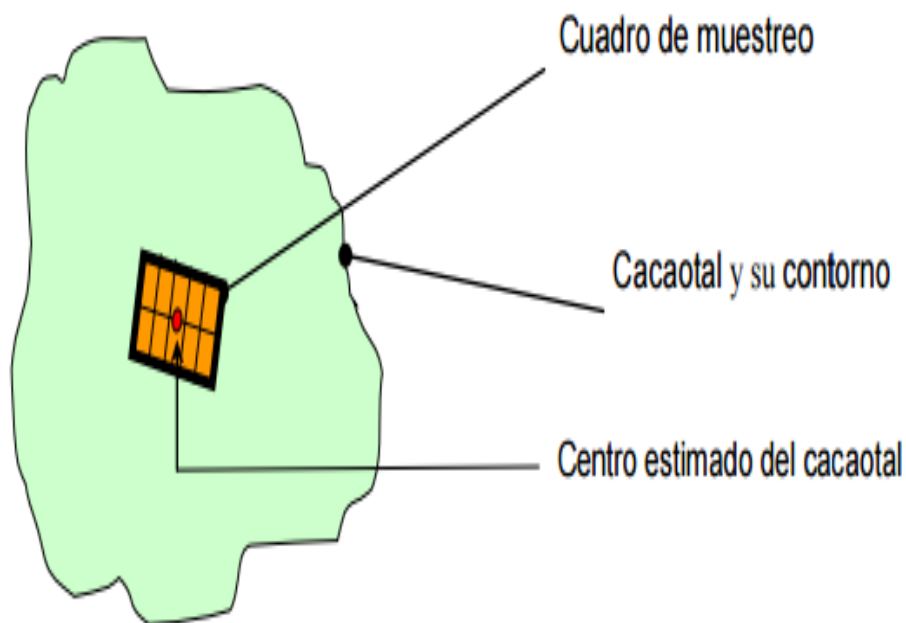


Figura 1. Diseño de la ubicación de muestreo de las parcelas de café y cacao

Fuente: Protocolo investigación CATIE (Macdiken, 1997)

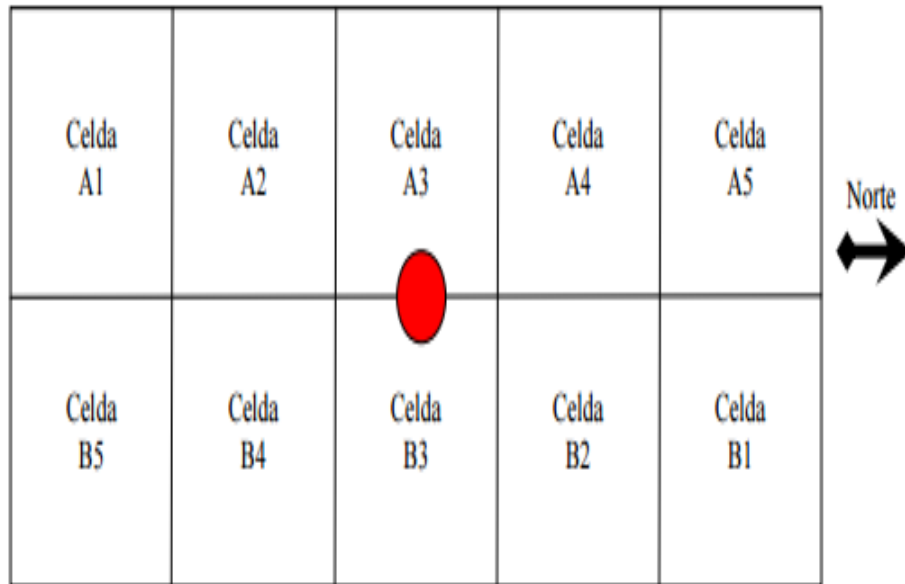


Figura 2. Toma de las sub-muestras de suelos en las parcelas de muestreo

Fuente: Protocolo investigación CATIE (Macdiken, 1997)

3.3.4.3. Muestreo de suelos

Se utilizó un cilindro de 10 cm de alto y 5,4 cm de diámetro (volumen 229,02 cm³). De cada submuestra se tomaron dos submuestras (10 y 20 cm de profundidad), estas submuestras se colocaron en diferentes bolsas plásticas las cuales fueron identificadas y selladas con el número de celdas y la profundidad de donde se tomó la muestra. Seguidamente, se tomaron diez submuestras (cinco submuestras de 0 a 10 cm de profundidad y cinco submuestras de 10 a 20 cm de profundidad) de cada área de muestreo, luego se pesaron y secaron a condiciones ambientales. Finalmente, se tomó una muestra representativa (muestra de 0-20 cm de profundidad) de cada parcela, dando como resultado un total de 20 muestras de suelo, las cuales luego son analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

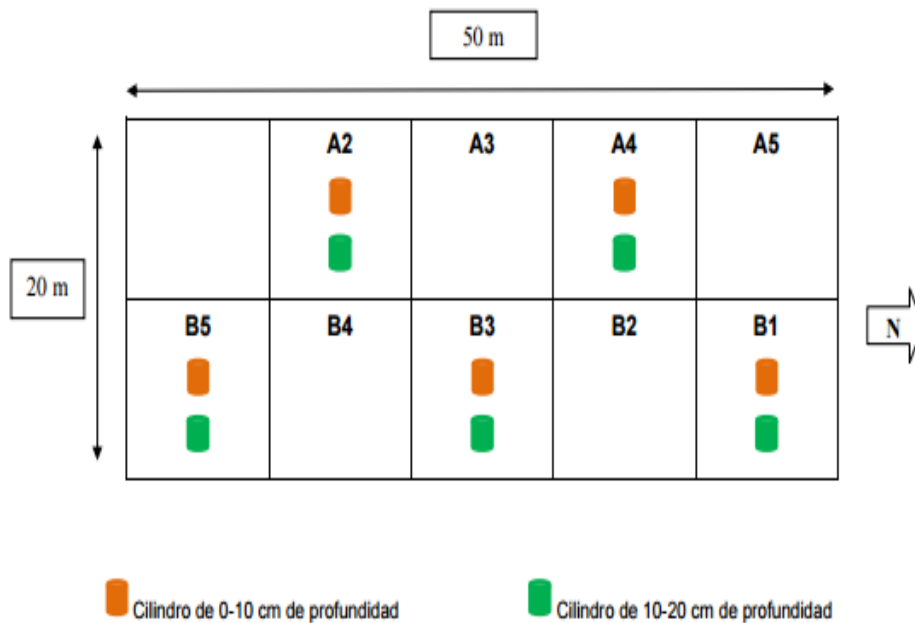


Figura 3. Metodología para la obtención de submuestras de suelos en las parcelas de muestreo

3.3.4.4. Toma de muestras para determinación de hojarasca

Se recolectaron hojarasca, considerándose a aquellas hojas secas y ramas secas (necromasa) con un diámetro máximo de 1 cm. En cada submuestra se eligió un sub área de cada parcela, en estos sitios se instaló un marco de $0,25 \text{ m}^2$ ($50 * 50 \text{ cm}$) y se recogió toda la hojarasca. Posteriormente se tomaron aleatoriamente un total de 10 submuestras de cada área de muestreo, se pesaron en el campo para obtener el peso húmedo e inmediatamente se mezclaron todas las submuestras donde se produjo una muestra compuesta de 400 g, se secó a temperatura ambiente que posteriormente se llevaron las muestras al laboratorio para determinación de peso seco a $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Se utilizó el peso seco de la muestra de agregado, el peso seco de los residuos recolectados en el área de prueba se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{C.H.} = [\text{Phs} - \text{Pss} / \text{Phs}] * 100 \quad (1)$$

Dónde:

C.H. = Contenido de Humedad

Phs = Peso húmedo de la submuestra

Pss = Peso seco de la submuestra

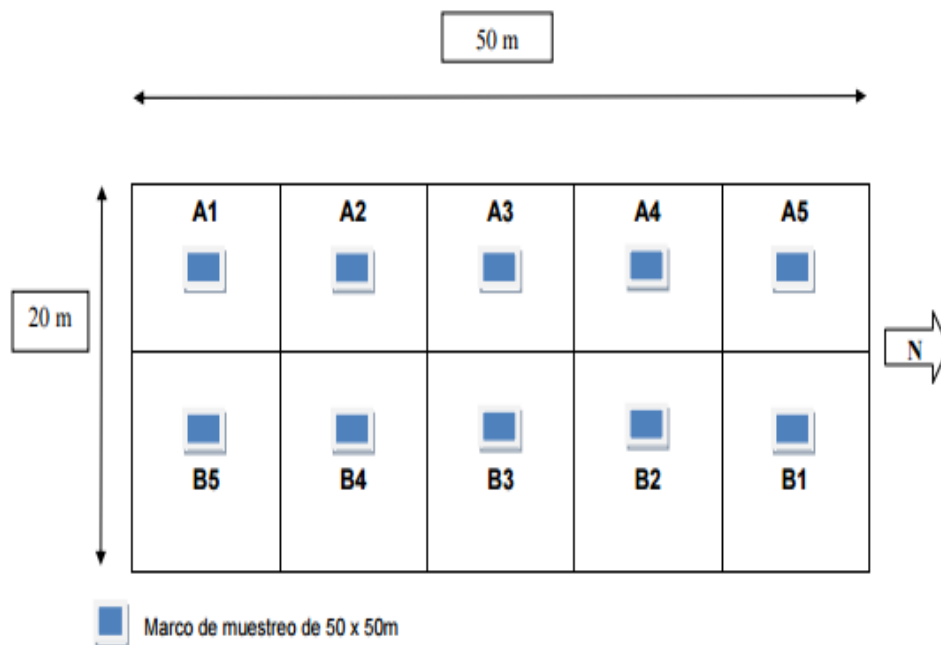


Figura 4. Puntos para obtención de submuestras de hojarasca

3.3.4.5. Muestreo de biomasa

a) Biomasa del suelo

Para este muestreo (muestreo de raíces finas) se utilizó el mismo cilindro que para el submuestreo del suelo, se tomó 0-20 cm de profundidad del suelo, se tomaron submuestras de 5 puntos del centro del área de muestreo. (con línea divisoria de 20 m de ancho). A continuación, se identificó y se selló cada submuestra, luego se lavó la tierra y se extrajo las raíces. Luego, las submuestras se homogenizaron, pesaron y secaron, obteniéndose una muestra representativa, lo que da como resultado un total de 10 muestras de raíces.

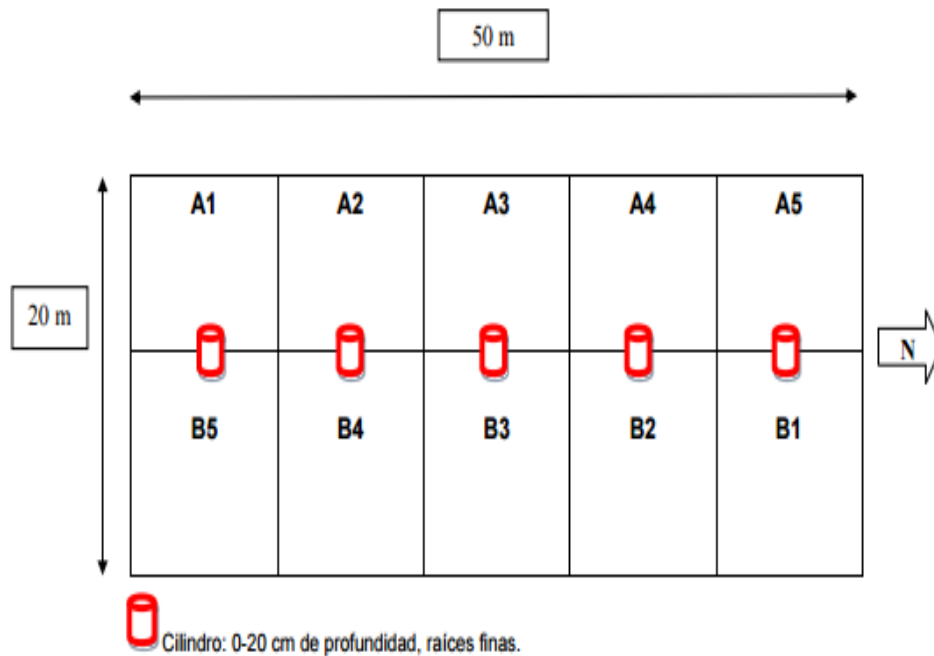


Figura 5. Puntos para obtención de submuestras de raíces finas

b) Biomasa aérea

- Medición de distancia de circunferencia

Para determinar el diámetro de cada árbol, se midió la circunferencia del tronco de todos los árboles a 30 cm del suelo con una cinta métrica y luego se dividió por π para obtener el diámetro (d_{30}).

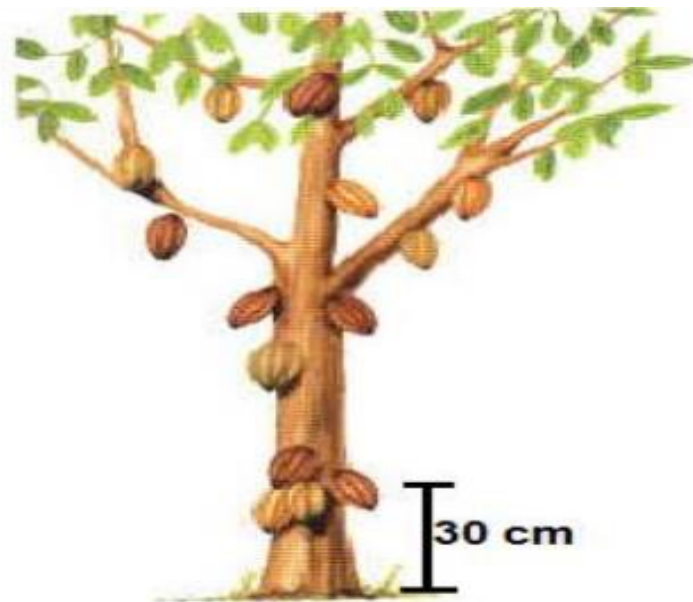


Figura 6. Estimación de la longitud de circunferencia (L_c) del árbol a 30 cm del suelo

- Estimación de la altura del sistema agroforestal de cacao y café

Se manipuló un palo de 4 m para estimar la altura del cacao. Los datos se registraron más tarde. Para medir la altura y circunferencia de los árboles de sombra de los sistemas agroforestales de cacao y café, se midió la circunferencia de los árboles de sombra a la altura del pecho (1,3 m) con corteza, y la circunferencia de los árboles a 0,30 m del suelo. Las medidas se realizaron con una cinta métrica, luego se tomó la altura de cada árbol de sombra y cacao, la altura de los árboles de sombra (obteniendo los ángulos y distancias) y se midió la altura de los árboles de sombra con un clinómetro y cinta diamétrica. Los árboles de cacao se midieron directamente con una cinta diamétrica y un palo largo, estas mediciones se realizaron en cada una de las 10 celdas de las 10 submuestras de la grilla de investigación (ALEGRE *et al.*, 2002).

Se utilizó la siguiente metodología para estimar la altura de cada árbol de los sistemas agroforestales:

$$H = \text{Tang}(X) * D \quad (2)$$

Dónde:

H = Altura (m)

Tang (X) = Tangente del ángulo en grados

D= Distancia o separación dentro de la persona que toma la medida y el árbol medido (m)

- Determinación de biomasa y carbono aéreo en las plantaciones agroforestales de cacao.

a) Uso de la ecuación logarítmica

Para estimar biomasa aérea se manejó la ecuación logarítmica encomendada por Andrade *et al.* (2008).

$$BA \text{ (kg/árbol)} = 10^{(-1.625 + 2.63x \log(d_{30}))} \quad (3)$$

Dónde:

BA = Biomasa arbórea arriba del suelo (kg/árbol)

D₃₀ = Diámetro del tronco a 30 cm de altura

c) Estimación de la biomasa absoluta

La determinación de la biomasa absoluta fue mediante la siguiente ecuación:

$$BA(\text{Kg}/\text{árbol}) = 10^{(-1.625 + 2.63 \times \log(d_{30}))} \quad (4)$$

Dónde:

B_{Ai} = Biomasa arbórea (kg/árbol)

BA = Biomasa arbórea (kg/árbol)

SBA = Desviación estándar de la biomasa arbórea

t = prueba de t (t=1.96 nivel de confianza 95%)

d) Conversión de la biomasa por unidad de área

Se calculó la biomasa vegetal por parcela, sumando las biomásas de todos los árboles medidos y registrados en las parcelas de 1ha.

$$BV (\text{tn/ha}) = (\sum_{i=1}^n B_{Ai} / \text{Área}) / 1000 \quad (5)$$

$$BV (\text{tn/ha}) = (BA_1 + BA_2 + \dots + BA_n) / 1000 \quad (6)$$

Dónde:

BV = Biomasa vegetal total (tn/ha)

BA = Biomasa arbórea (kg)

Factor 1000 = conversión de kg a tn

e) Estimación de carbono aéreo

La estimación del carbono se realizó mediante el factor establecido por el IPCC (2000) de 0.5.

$$CBV (\text{tC/ha}) = BVT \times 0.5 \quad (7)$$

Dónde:

CBV = Carbono en la biomasa vegetal (tC/ha)

BVT = Biomasa vegetal total (g)

0.5 = Constante

f) Estimación de la biomasa de la hojarasca

Para evaluar la biomasa de hojarasca, se muestreó aleatoriamente una parcela formada por 4 submuestras de un marco de 0,50 m x 0,50 m, con toda la hojarasca disponible embolsada dentro de un marco de 0,25 m². Su peso fresco total se midió en una báscula de campana. Las parcelas fueron seleccionadas al azar para lo cual se dividió el área en cuadrículas. Luego se seleccionaron aleatoriamente cuatro de ellos como sub-bloques para el muestreo de basura (ALEGRE *et al.*, 2002).

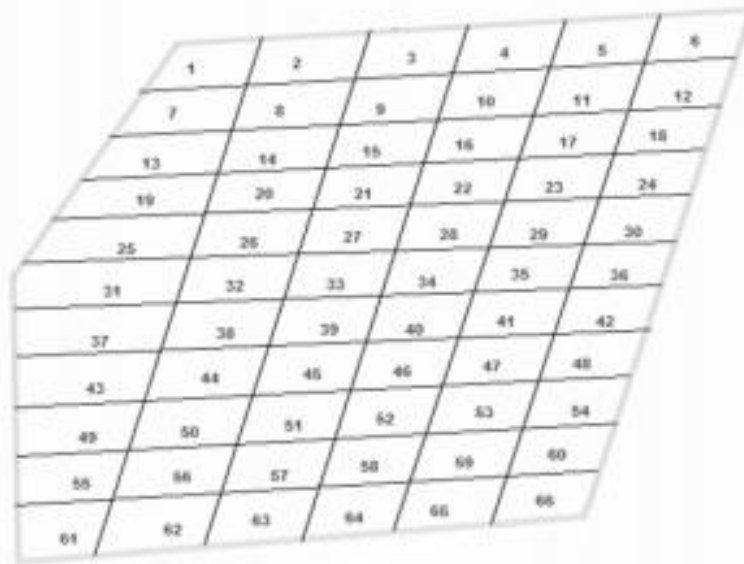


Figura 7. Ejemplo para la determinación de las sub parcelas de muestreo al azar

3.3.4.6. Muestreo de necromasa

La necromasa son las ramas de árboles, frutos u otras partes muertas o en descomposición con un diámetro superior a 1 cm. Cada necromasa fue recolectada en subparcelas de 10 x 10 metros y posteriormente fue pesada en campo para obtener un peso húmedo. Consecuentemente fue mezclada la necromasa (homogénea), tomándose una muestra representativa, para luego ser llevada para ser secada a temperatura ambiente y se llevó al laboratorio donde se determinaron el peso de materia seca y el contenido de carbono y se extrapolaron a toda la muestra (ALEGRE *et al.*, 2002).

Es preciso indicar que en aquellos casos donde se encontraron necromasa en troncos muy grandes que no se lograron pesar en el campo, se midieron para tasar el volumen y se probaron con un cilindro de volumen conocido para determinar la cantidad de

materia seca que contenían y esas muestras luego fueron analizadas en el laboratorio para determinar la cantidad de carbono que contenían (ALEGRE *et al.*, 2002).

3.3.4.7. Determinación de las muestras de hojarasca, raíces finas y necromasa

- Preparación de las muestras para el envío al laboratorio

Para efectuar el análisis químico de las muestras en el laboratorio, estas se secaron al aire libre durante un mes (la temperatura media anual en la zona de estudio es de 26 °C). Después del secado en el ambiente, se preparó una muestra/área de muestra representativa:

Muestra de hojarasca con un peso de 250 g.

Muestra de raíces finas de 30 g.

Muestra típica de necromasa (conformado por todo el material total obtenido al extraer una muestra de cilindro, troncos y árboles caídos o procesos de descomposición.

Consecutivamente, la cuantía de material que conformó la muestra típica se colocó en bolsas de nailon, estableciendo un ambiente hermético para la muestra, cuyo propósito fue evitar la pérdida de la humedad durante el secado. En el laboratorio, las muestras se secaron en un horno durante 48 h a 65 °C, que se utilizó para determinar el contenido de humedad total de cada muestra/área de muestra representativa (ALEGRE *et al.*, 2002). Para conseguir el valor de biomasa, el contenido de humedad se determinó de la siguiente manera:

$$C.H = (Phs - Pss) / Phs \quad (8)$$

Dónde:

C.H = Contenido de Humedad

Phs = Peso húmedo del suelo (g)

Pss = Peso seco del suelo (g)

Con los valores del contenido de humedad al finalizar se procedió a calcular la proporción del peso húmedo, que correspondía a la biomasa de las muestras:

$$Y = Pht - (Pht * CH) \quad (9)$$

Donde:

Y = Biomasa (g)

Pht = Peso húmedo total (g)

CH = Contenido de Humedad (g)

Los valores resultantes fueron divididos por 1 000 000, la cual se obtuvieron cantidades expresado en toneladas. Este valor en toneladas fue multiplicado por el contenido de carbono (%) de cada muestra, dando como resultado toneladas de carbono sólido. Las toneladas de carbono fueron divididas en metros totales de la muestra (1 000 m²). Este procedimiento dio tC/m² y luego se multiplicó por 10,000 m² dando el resultado final en tC/ha (Macdiken, 1997).

$$\text{Cantidad de carbono almacenado en el suelo (tC/ha)} = \text{CC} * \text{Da} * \text{P} \quad (10)$$

Donde:

P = Profundidad de muestreo del suelo (cm)

CC = Contenido de carbono (%)

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm³)

Los valores de densidad aparente del suelo fueron determinados por el método del cilindro, el cual consiste en introducir un cilindro metálico al suelo para extraer una muestra de volumen aproximado de 502,66 cm³ y para posteriormente llevado al estufa a 105 °C por 72 h, para determinar su peso seco (ms).

3.3.5. Método de análisis de datos

Los datos obtenidos de los análisis fisicoquímicos y de las cantidades de carbono orgánico en las diferentes fracciones de los sistemas agroforestales en estudio, fueron tabulados aplicando la estadística descriptiva con la finalidad de evaluar su comportamiento entre las dos unidades de estudio. Seguidamente, se encontraron diferencias estadísticas entre las dos unidades de estudio respecto a las variables dependientes, se utilizaron el comparador de medias llamado prueba T para la inferencia basadas para 2 muestras. Finalmente, se describió e interpretaron los resultados obtenidos de los software InfoStat v.1.0 y Excel 2019, este último representado mediante el uso de tablas y graficas.

3.3.5.1. Método de procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se realizó a través de los software InfoStat v.1.0 y Excel 2019, en la cual se elaboró tablas, histogramas y graficas de barra que se demostraron los resultados obtenidos. Donde inicialmente, los valores que se obtuvieron en ambos de ambos sistemas de uso de suelo fueron procesados en el programa Microsoft Excel 2019, creando tablas que sirvieron para ejecutar el análisis de los resultados. Finalmente, las tablas obtenidas de los resultados se procedieron a crear los graficas por el promedio de cada parámetro, así como el promedio de almacenamiento de carbono en cada fracción del componente agroforestal. En el presente estudio, se contrastó la hipótesis planteada con la prueba de hipótesis “t-student” donde se tuvieron un grupo experimental con dos muestras independientes que fueron analizadas dichas muestras entre ambos sistemas de uso.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Stock de carbono orgánico

4.1.1. Biomasa aérea

En el Tabla 1, se aprecia que los valores de significancia de biomasa aérea son mayores a 0,05, no hay evidencia para rechazar esta hipótesis nula. Por lo tanto, en base a los resultados podemos afirmar con una seguridad del 95 % de que los datos provienen de una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk).

Tabla 1. Prueba de normalidad de datos de cantidad de carbono orgánico almacenado en la biomasa aérea

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Biomasa aérea	SAF- Cacao	0,94	9	0,7125	1,00	9	**
	SAF- Café	0,97	9	0,914	1,00	9	**

Nota: * = significativo, ** = altamente significativo

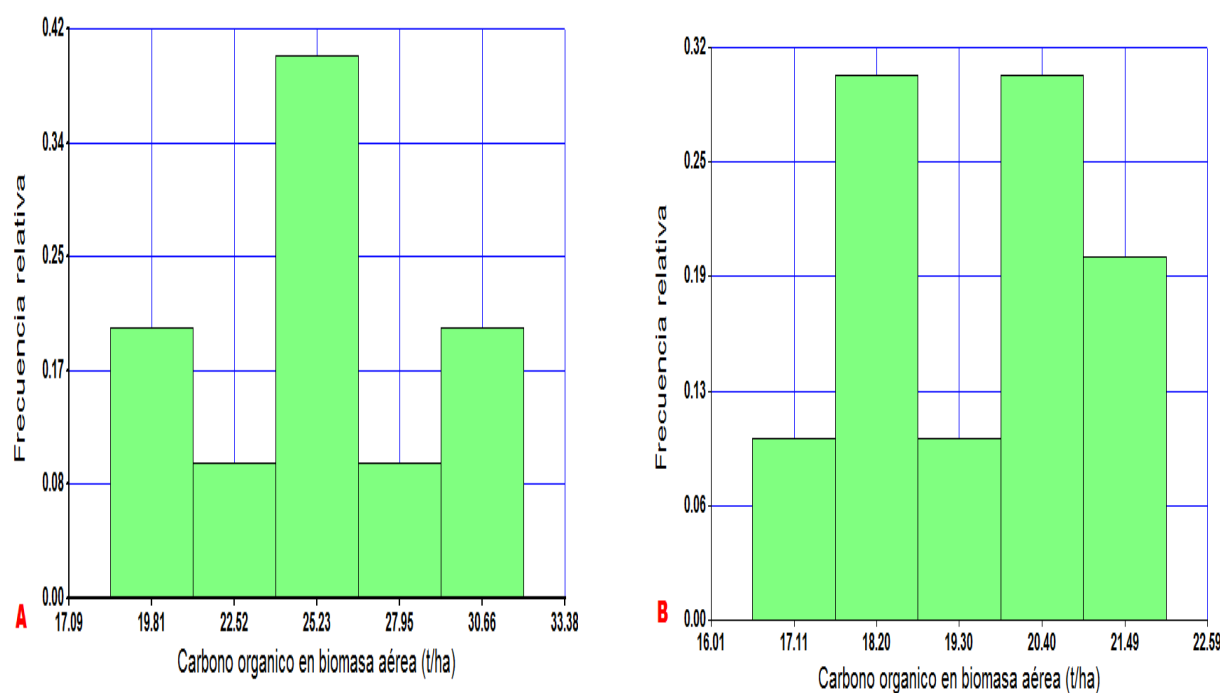


Figura 8. Histograma de frecuencia relativa de cantidad de carbono orgánico almacenado en biomasa aérea de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)

En el Tabla 2, se observa la prueba de t-student (para pruebas independientes) la cual percibe datos de almacenamiento de carbono orgánico almacenado en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de cacao y café (sig. < 0,05), se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna, al existir certeza estadística que los sistemas agroforestales en estudio almacenan mayor carbono orgánico en la fracción biomasa aérea.

Tabla 2. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea

Variable	Carbono orgánico en biomasa aérea (tC/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Biomasa aérea	25,27	19,57	0,0010
Varianza	18,21	2,63	
T		3,95	
gl		18	

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

En la Tabla 2, se observó la prueba de t-student para la variable carbono orgánico almacenado en la biomasa aérea, la cual se indicó que los sistemas agroforestales (SAF) de cacao almacenaron mayor carbono en la biomasa aérea (25,27 tC/ha) respecto al SAF de café (19,57 tC/ha). Asimismo, el SAF de cacao (Tabla 4), almacenan mayor carbono en la biomasa arbustiva (2,08 tC/ha) sobre el SAF de café (1,23 tC/ha). Nuestros resultados concuerdan con los reportado por Oelbermann et al., 2004, al reportar que en la región San Martín los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en asociatividades con especies forestales maderables y frutales, el carbono orgánico almacenado en la biomasa arbórea de los árboles vivos se encuentra en un rango de 12,09 a 35,5 tC/ha, seguido por la biomasa de hojarasca quien mostró valores que oscilan en el rango de 4-9,97 tC/ha, por otra parte, la biomasa de los árboles muertos en pie y caídos ostentaron valores muy variables y bajos. El carbono almacenado en la biomasa aérea fue mayor en el suelo a diferencia del estrato herbáceo y hojarasca, debido a la mayor estabilidad del suelo al almacenar carbono. De la investigación, los componentes que almacenaron mayor carbono fueron la necromasa (fina y gruesa), herbácea, mientras que las ramas, hojas y raíces fueron quienes almacenaron menor cantidad de carbono, encontrándose 0.85 tC/ha para raíces finas y 3,2 tC/ha almacenado en ramas y raíces gruesas (< 2.5 % del carbono total por cada uno). La biomasa aérea y la necromasa almacenaron el 14 % del carbono total del sistema (18,4 tC/ha) (Valero 2004).

Los SAFs en regiones húmedas, almacenaron entre 12 y 228 tC/ha.año en la biomasa aérea y raíces (Schroeder, 1994), mientras que para las zonas templadas es de 1.9×10^9 tC/ha.año (Oelbermann *et al.*, 2004). Los resultados obtenidos fueron corroborados por Rajagopal (2004), quien refiere que el contenido de carbono en la fracción biomasa se encuentra en el rango de 41-75 tC/ha.año encontrándose mayor abundancia almacenado en los árboles, existiendo valores hasta por cinco veces mayor al carbono almacenado por arbustos y hierbas. Esta variabilidad de reservorio de carbono sucedió por la especie en estudio, ya que varió la cantidad en función del tipo, densidad, regímenes de manejo y edad de los sistemas.

4.1.2. Biomasa arbustiva

En la Tabla 3, se aprecia que los valores obtenidos mostraron que significativamente son mayores al ($\alpha > 0,05$), por lo que a un 95 % de probabilidad no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se afirma con una seguridad del 95 % que el comportamiento de los datos provienen de una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smimov).

Tabla 3. Datos de carbono orgánico almacenado en biomasa arbustiva en sistemas agroforestales según la prueba de normalidad

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Biomasa arbustiva	SAF- Cacao	0,94	9	0,6624	0,87	9	**
	SAF- Café	0,93	9	0,5952	0,74	9	**

Nota: * = significativo, ** = altamente significativo

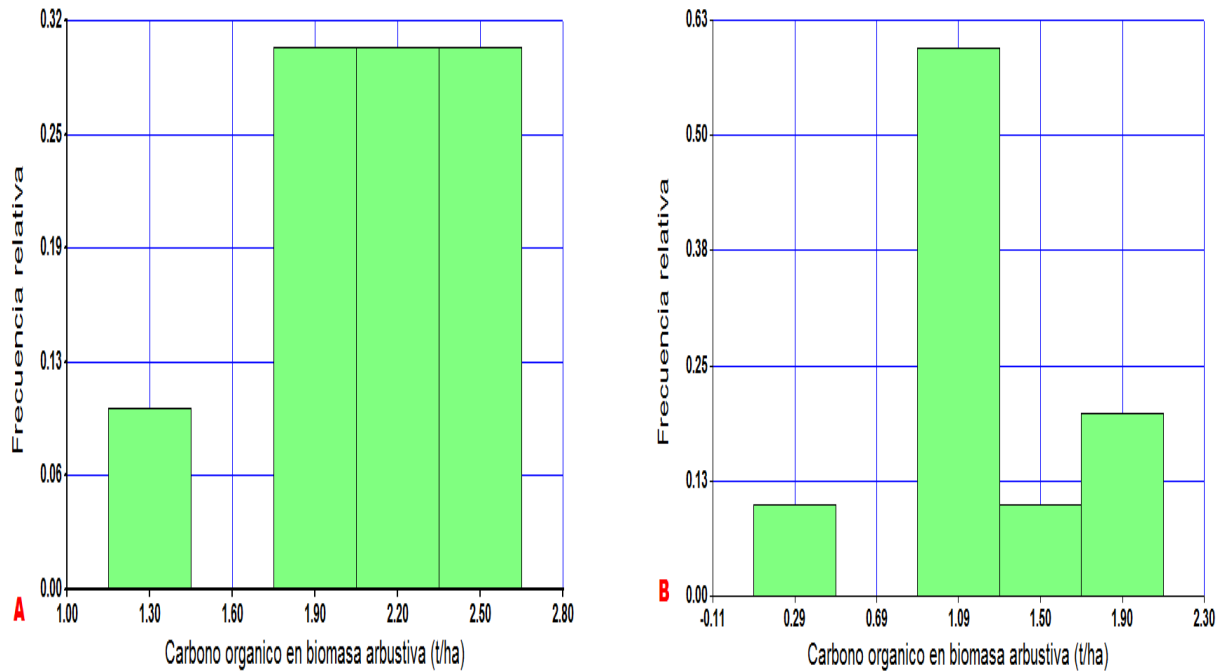


Figura 9. Histograma de frecuencia relativa para el almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa arbustiva de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)

En la Tabla 4, se aprecia los valores obtenidos según la prueba de t-student, la cual comprende los datos para el almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa arbustiva. Rechazándose la hipótesis nula ($\text{sig.} < 0,05$), al existir evidencia estadística que los sistemas agroforestales de cacao (2,08 tC/ha) almacenaron mayor carbono sobre el sistema agroforestal de café (1,23 tC/ha).

Tabla 4. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa arbustiva

Variable	Carbono orgánico en biomasa arbustiva (tC/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Biomasa arbustiva	2,08	1,23	0,0005
Varianza	0,18	0,29	
T	3,93		

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

4.1.3. Necromasa

En el Tabla 5, se observa que los valores de necromasa respecto a la significancia estadística son mayores a ($\alpha > 0,05$), afirmando con una certeza del 95 % que el comportamiento de los datos provienen de una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smimov).

Tabla 5. Datos de carbono almacenado en la necromasa según Prueba de normalidad

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Necromasa	SAF- Cacao	0,90	9	0,3632	0,98	9	**
	SAF- Café	0,92	9	0,5110	0,81	9	**

Nota: * = significativo, ** = altamente significativo

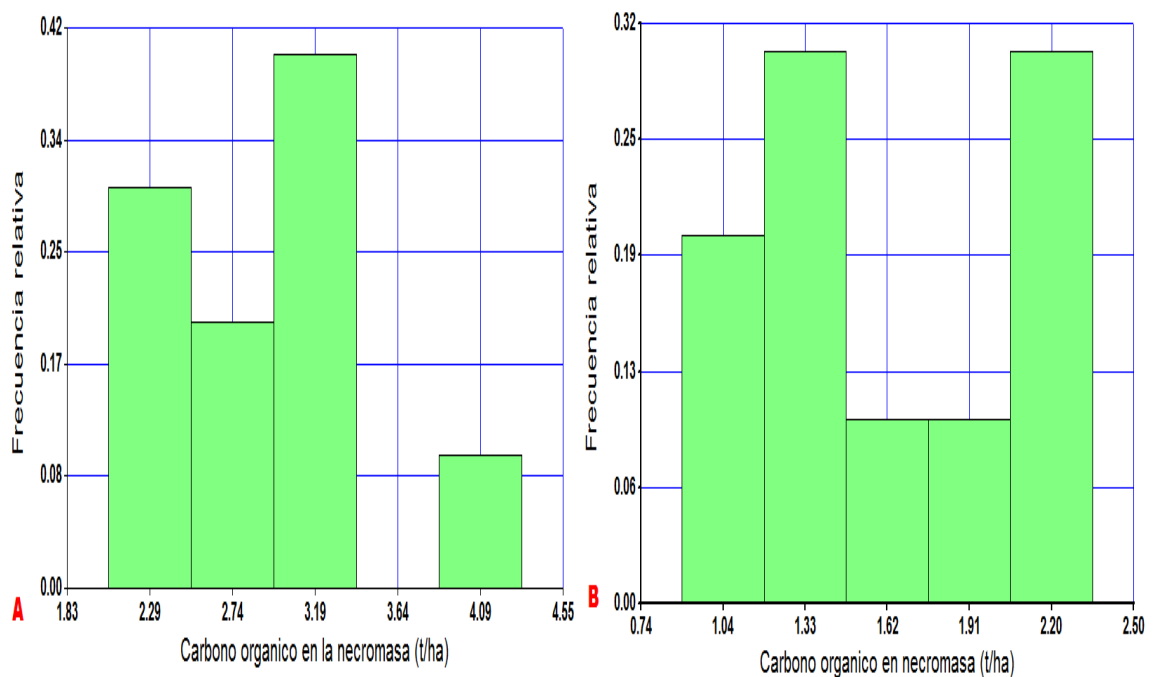


Figura 10. Histograma de frecuencia de carbono orgánico almacenado en la necromasa

En la Tabla 6, se muestra la prueba de t-student para valores de almacenamiento de carbono en la fracción necromasa de SAF de cacao y café.

Tabla 6. Prueba t-student del carbono orgánico en la necromasa

Variable	Carbono orgánico en la necromasa (tC/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Necromasa	2,90	1,64	<0,0001
Varianza	0,40	0,23	
T		4,98	
gl		18	

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student

En la Tabla 6, se observan los resultados obtenidos por la prueba de t-student, la cual comprendió el almacenamiento de carbono orgánico en la necromasa del sistema agroforestal de cacao y café. Rechazando la hipótesis nula (sig. < 0,05), al existir evidencia estadística que los sistemas agroforestales de cacao almacenaron mayor carbono (2,90 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de café (1,64 tC/ha). Respecto al almacenamiento de carbono en la necromasa, el SAF de cacao presentó mayor almacenamiento de carbono (2,90 tC/ha) sobre el SAF de café (1,64 tC/ha). Sin embargo, no se encontraron diferencias referente al carbono orgánico almacenado en la fracción hojarasca de SAFs, cuyos valores fluctúan en el rango de 2,94 - 2,99 tC/ha. Similar comportamiento se produjo para el almacenamiento de carbono en el suelo (42,50 y 41,14 tC/ha, respectivamente). Respecto al carbono en las raíces finas existió mayor almacenamiento en el sistema agroforestal de café (7,12 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de cacao (6,41 tC/ha). Los resultados obtenidos pudieron corroborarse con lo encontrado por Brown y Lugo (1992), quienes determinaron almacenamiento de carbono orgánico con valores que oscilaron de 2,6 y 3,8 tC/ha en la fracción necromasa de bosques primarios. Asimismo, Delaney *et al.* (1997), obtuvo valores en el rango de 2,4 y 5,2 tC/ha de carbono en la misma fracción del componente agroforestal. Por su parte, Tanner (1980), encontró en el rango de 3,8 a 6,0 tC/ha en la fracción necromasa de bosques en la zona húmeda de Jamaica. Mientras, que lo reportado por Raich (1983), obtuvo valores de 0,7 tC/ha de necromasa en un bosque secundario en la zona húmeda de Costa Rica. Finalmente Schroeder y Winjum (1995) exhibieron valores de almacenamiento de carbono orgánico en la hojarasca en el rango de 2,2 y 7,8 %.

4.1.4. Hojarasca

En la Tabla 7, apreciamos que los valores de carbono orgánico en la hojarasca muestran significancia con un resultado mayor a 0.05, por lo que no existe certeza para rechazar esta hipótesis nula. En tal sentido con una seguridad del 95 % afirmamos que los datos de carbono almacenado en la hojarasca provienen de una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smimov).

Tabla 7. Datos de carbono orgánico almacenado en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Hojarasca	SAF- Cacao	0,86	9	0,1062	0,99	9	**
	SAF- Café	0,91	9	0,4263	1,00	9	**

Nota: * = significativo, ** = altamente significativo

La Figura 11, se observa el histograma de frecuencia relativa de carbono orgánico almacenado en la fracción hojarasca para los sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B) en estudio.

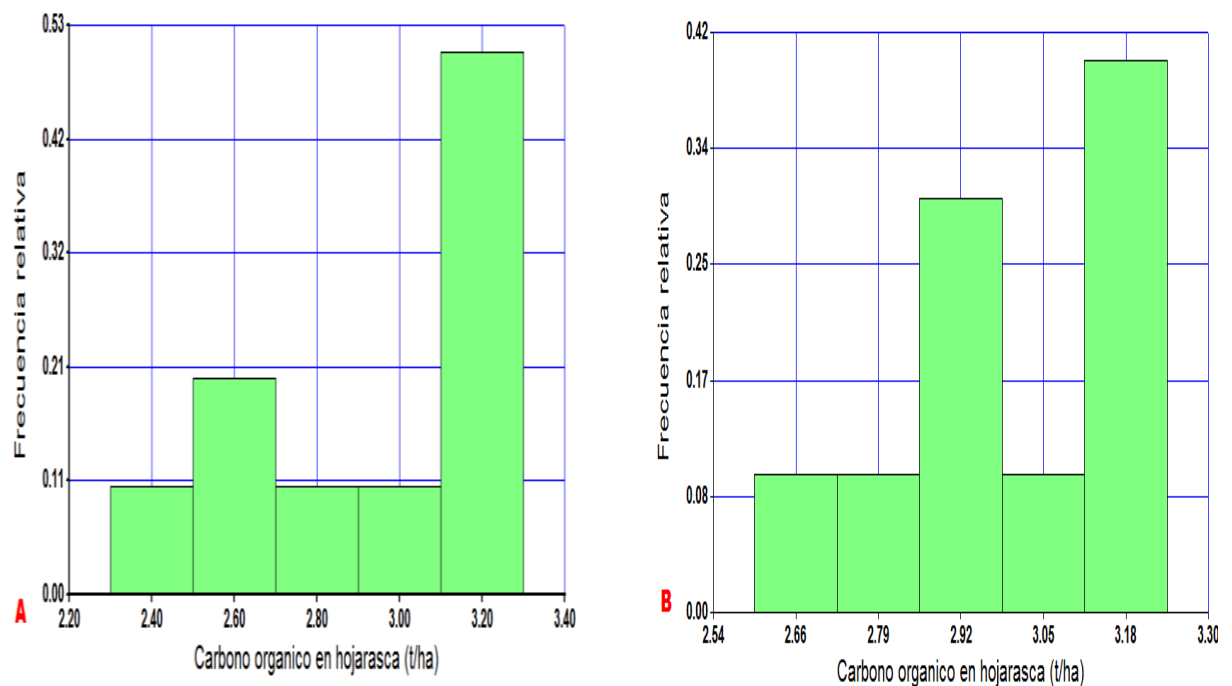


Figura 11. Histograma de frecuencia relativa de almacenamiento de carbono orgánico en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)

La Tabla 8, se exhibió los resultados de la prueba de t-student (para pruebas independientes) para el almacenamiento de carbono orgánico en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cacao y café. Por ende, con un sig. > 0.05, se admitió la hipótesis nula y se rechazó la hipótesis alterna, por no existir certeza estadística que los sistemas agroforestales de cacao y café difieren en la cantidad de carbono almacenado en la hojarasca (2.94 t/ha y 2.99 t/ha respectivamente).

Tabla 8. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea

Variable	Carbono orgánico en biomasa aérea (t/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Biomasa aérea	2,94	2,99	0,3453
Varianza	0,13	0,05	
T		-0,40	
gl		18	

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

4.1.5. Suelo

La Tabla 9, muestra los valores de carbono almacenado en el suelo, posterior al procesamiento de datos se observa que los valores de significancia son mayores a 0,05. Por tanto, se afirma con una seguridad del 95 % que los datos provienen de una distribución normal.

Tabla 9. Datos de carbono orgánico almacenado en la hojarasca de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Suelo	SAF- Cacao	0,91	9	0,4309	1,00	9	**
	SAF- Café	0,95	9	0,7494	1,00	9	**

*Nota: * = significativo, ** = altamente significativo*

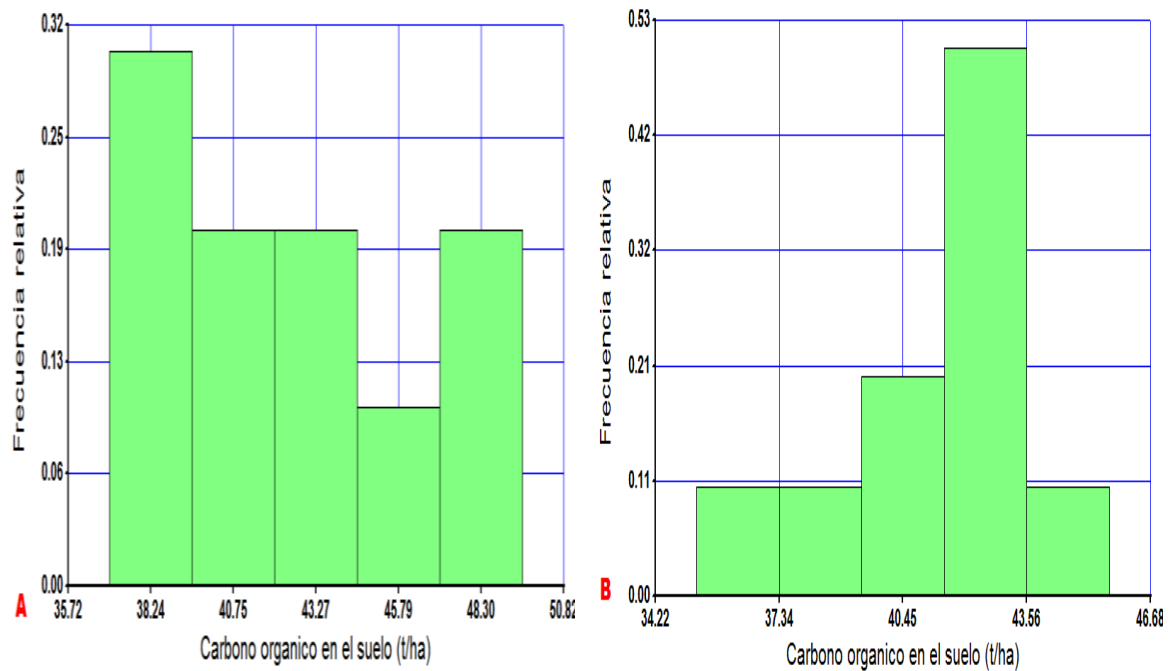


Figura 12. Histograma de frecuencia relativa de almacenamiento de carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)

La Tabla 10, muestra la prueba de t-student (para pruebas independientes) la misma que constituye los datos del almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de los sistemas agroforestales de cacao y café. Por ello, con un sig. > 0,05, se aceptó la hipótesis nula y se rechazó la hipótesis alterna, al no existir evidencia estadística en los sistemas agroforestales de cacao y café ya que difieren en el carbono almacenado en el suelo (42,50 tC/ha y 41,14 tC/ha, respectivamente).

Tabla 10. Prueba t-student del carbono orgánico en la biomasa aérea

Variable	Carbono orgánico en la biomasa aérea (tC/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Suelo	42,50	41,14	0,2080
Varianza	18,56	8,13	
T	0,83		
gl	18		

Nota: $p <= 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

4.1.6. Raíces finas

La Tabla 11, se muestra que los valores del carbono orgánico almacenado en las raíces finas son mayores al ($\alpha > 0,05$), por lo que no existe certeza estadística para rechazar esta hipótesis nula. Por lo que con una seguridad del 95 % podemos afirmar que los datos de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao y café en la fracción de las raíces finas provienen de una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smimov).

Tabla 11. Datos de carbono orgánico almacenado en raíces finas de sistemas agroforestales de cacao y café según Prueba de normalidad

Variable	SAF	Shapiro-Wilk			Kolmogorov-Smimov		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Raíces finas	SAF- Cacao	0,89	9	0,2538	1,00	9	**
	SAF- Café	0,94	9	0,6748	1,00	9	**

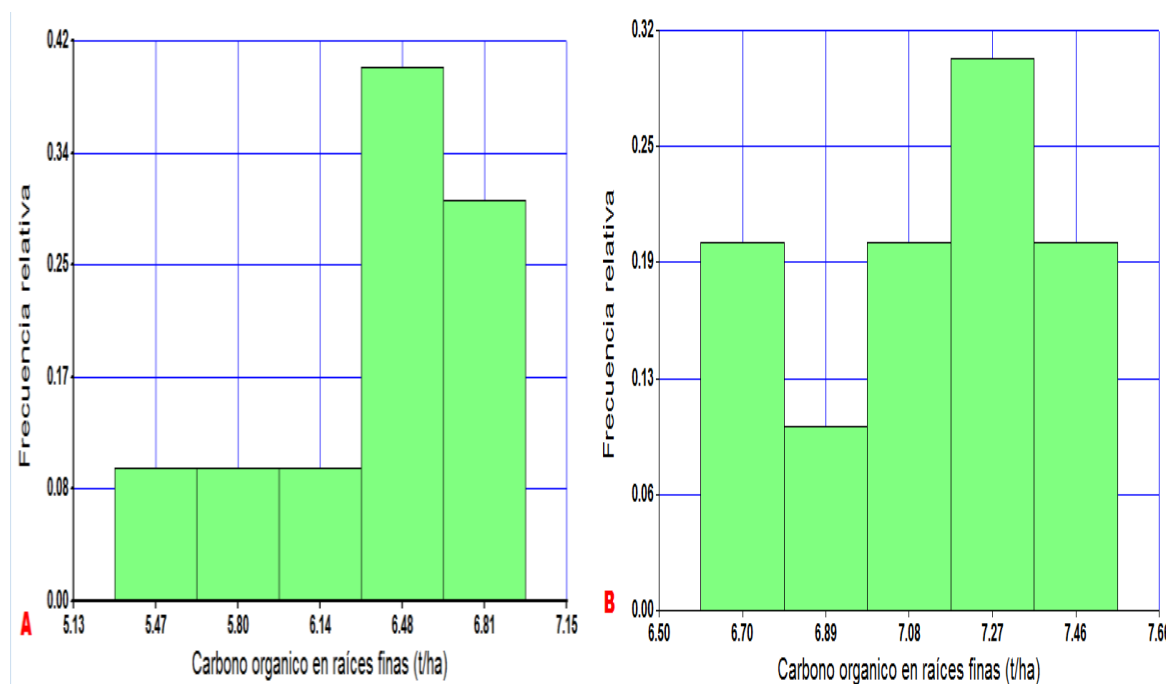


Figura 13. Histograma de frecuencia relativa de carbono almacenado en raíces finas de sistemas agroforestales de cacao (A) y café (B)

La Tabla 12, se exhiben los resultados de la prueba de t-student, la cual comprendieron los datos de carbono orgánico almacenado en la fracción de las raíces finas de los arreglos agroforestales de cacao y café en estudio. Existe evidencia estadística que los arreglos agroforestales de café acopian mayor carbono (7,12 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de cacao (6,41 tC/ha).

Tabla 12. Prueba t-student del carbono en la biomasa arbustiva

Variable	Carbono orgánico en biomasa arbustiva (t/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Raíces finas	6,41	7,12	0,0005
Varianza	0,24	0,09	
T		-3,89	
gl		18	

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

4.2. Carbono orgánico total

La Tabla 13, muestra los resultados de la prueba de t-student (para pruebas independientes), la misma que la cual comprendió los datos de almacenamiento de carbono orgánico el suelo de los sistemas agroforestales de cacao y café. Se rechazó la hipótesis nula (sig. < 0,05), al existir evidencia estadística que los arreglos o sistemas agroforestales de cacao almacenaron mayor cantidad de carbono (82,05 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de café (71,34 tC/ha).

Tabla 13. Prueba t-student para muestras independientes para el carbono orgánico total

Variable	Carbono orgánico total (t/ha)		
	SAF-Cacao	SAF-Café	p-valor
Carbono total	82,05	71,34	0,0002
Varianza	29,23	31,17	
T		4,36	
gl		18	

Nota: $p \leq 0.05$ indica diferencias significativas según prueba de t-student.

De acuerdo con los resultados obtenidos, hay notables diferencias en la acumulación de carbono de acuerdo con el SAF. El carbono fijado es más relevante en los componentes de la biomasa de los árboles y arbustos en los arreglos agroforestales, la cantidad de almacenamiento depende directamente de las dimensiones y cantidad de especies arbóreas, considerando siempre el tamaño de los árboles (Cambardella y Elliott, 1992). Concordamos con lo reportado por Young (1997), al referir que, la productividad del componente arbustivo o biomasa aérea está directamente relacionado al tipo de arreglo o sistema agroforestal, y del ecosistema donde se encontraron valores de almacenamiento que fluctuaron de 2,3-48 tC/ha.año, obedeciendo el número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales. Por otra parte, los resultados obtenidos se atribuyeron a los factores como la vegetación presente en campo definitivo, los residuos sólidos, la composición química de los materiales que lo constituyen, factores climáticos (temperatura y humedad) y las propiedades del suelo (Stevenson, 1994).

En la presente investigación, se rechazó la hipótesis nula al existir evidencia estadística que el sistema agroforestal de cacao almacenó mayor carbono (82,05 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de café (71,34 tC/ha). El carbono acumulado por la unidad de superficie es diverso influenciado por el tipo y estado del bosque. Sin embargo, es preciso referir que quienes siempre destacan son los bosques adultos, encontrándose valores de carbono hasta de 606,80 tC/ha (284,75 tC/ha biomasa aérea, 78,92 tC/ha en raíces, 2,81 tC/ha sotobosque, 55,56 tC/ha necromasa, 5,77 tC/ha hojarasca, y 181,81 tC/ha en los primeros 30 cm de suelo) (Gayoso, 2006).

Palm y Sanchez (1990) refieren que los arreglos agroforestales de laurel-cacao fijaron el carbono orgánico con valores encontrados en el rango de 43 y 62 tC/ha, sin embargo, de su estudio refieren que la especie vegetal laurel almacenó carbono en un rango de 80-85 % del carbono total en la biomasa. Los resultados coinciden con lo reportado en Talamanca, al evidenciarse almacenamiento de carbono en el rango de 42-61 tC/ha en cacaotales arbolados en loma y valle (Chave et al., 2005). Mientras que Palm y Sanchez (1990) reportaron un almacenamiento de carbono similar para los sistemas agroforestales (39-102 tC/ha).

V. CONCLUSIONES

1. El sistema agroforestal de cacao almacenó 25,27 tC/ha de carbono orgánico en la fracción de la biomasa aérea, 2,08 tC/ha en la biomasa arbustiva, 2,90 tC/ha en la necromasa, 2,94 tC/ha en la hojarasca, 42,50 tC/ha en el suelo y 6,41 tC/ha en las raíces finas. Mientras que el sistema agroforestal de café almacenó 19,57 tC/ha en la biomasa aérea, 1,23 tC/ha en la biomasa arbustiva, 1,64 tC/ha en la necromasa, 2,99 tC/ha en la hojarasca, 41,14 tC/ha en el suelo y 7,12 tC/ha en las raíces finas.
2. En la presente investigación, se rechazó la hipótesis nula al existir evidencia estadística que el sistema agroforestal de cacao almacenó mayor carbono (82,05 tC/ha) sobre el sistema agroforestal de café (71.34 tC/ha).

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Los arreglos o sistemas agroforestales de cacao y café tienden a tener una media tasa de almacenamiento respecto a otros sistemas, por lo que se sugiere tener en cuenta este arreglo agroforestal para la captura de carbono para reducir la emisión de CO₂ debido a su alta producción de hojarasca.
- En investigaciones similares es preciso tener en cuenta las condiciones ambientales que conforman el ecosistema de cada parcela agrícola y estos compararlos con los resultados de las fracciones de carbono, por lo que se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas portátiles.
- El componente suelo tiene un sin fin de interacción con componentes bióticos y abióticos por lo que se sugiere tomar muestras de suelos relacionados con la respiración microbiana y compararlos con la cantidad de carbono almacenado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albrecht , J., Kandji, O. (2003). Contenido y distribución espacial de nutrientes móviles en la zona no saturada en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. *Boletín Geológico y Minero*, 120(3), 393-408. <https://digital.csic.es/handle/10261/277235>
- Andrade, F, Cirilo, A, Uhart S, Otegui M. (2008). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial Médica Panamericana. <http://www.fertilizando.com/articulos/Manejo%20del%20Fosforo%20en%20Maiz.asp>
- Andrade, H. (2000). Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. *Agroforestería en las Américas*, 7(26), 50-52. <http://bco.catie.ac.cr:8087/portal-revistas/index.php/AGRO/article/view/583>
- Ávila, G. Jimenez, F., Beer, J., Gómez, M. y Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforesterías en las Américas*, 8(30), 32-35. https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Jimenez9/publication/288653502_Almacenamiento_fijacion_de_carbono_y_valoracion_de_servicios_ambientales_en_sistemas_agroforestales_en_Costa_Rica/links/568a728608ae051f9afa4e52/Almacenamiento-fijacion-de-carbono-y-valoracion-de-servicios-ambientales-en-sistemas-agroforestales-en-Costa-Rica.pdf
- Balbontín, K., baameur A., hartz, T., turini T., Natwick E., Takele E., Aguiar J., Cantwell M. y Mickler, J. (2009). *Watermelon Production in California*. University of California Division of agriculture and Natural Resources. <https://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/7213.pdf>
- Brown, O. (1997). *Origin and regulation of nutrient supply to plants in humid tropical grassland*. In International Grassland Congress
- Callo, D. (2001). Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.

- Cambardella, C. y Elliott, E. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Chavez, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, C., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Nelson, B., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Fonseca, K., Keller, P. y Negro, I. (2006). Maíz: Efecto de la fertilización con fósforo y azufre en la zona central de Santa Fé. *INPOFOS Informaciones Agronómicas*, 31, 9-10. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/F20E2B29438E37E085257995007A258E/\\$FILE/3.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/F20E2B29438E37E085257995007A258E/$FILE/3.pdf)
- Food and Agriculture Organization of The United Nations - FAO. (1999). *Faostat*. <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>
- Fragoso, C y Lavelle, P. (1998). Earthworm communities of tropical rain forests. *Soil Biology and Biochemistry*. 24(12), 1397-1408.
- Fundación Solar. (2000). *Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas*. Oxford Forestry Institute y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9730>
- Gómez-Echeverri. (2000). *Opciones de captura de carbono en el sector forestal*. En: *Cambio Climático: Una visión desde México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2000). Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>

- Jandl, O. (2003). Plant Microclimate. In Coombs, J.; Hall, O.O.; Long, S.P.; Scurlock, J.M. (eds.). *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. 2da ed. Pergamon Press, Oxford, G.B. 725 p.
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas. Posibilidades para un aprovechamiento sostenido*. Biblioteca Digital Instituto Forestal. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/1232>
- Maddiken, K. (1997). *A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agriculture Development. https://www.researchgate.net/publication/237434580_A_Guide_to_Monitoring_Carbon_Storage_in_Forestry_and_Agroforestry_Projects
- Moguel, P. y Toledo, V. (1998). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11-21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153>.
- Nair, Q. (1993). Investigations on decomposition of foliage of woody species using a perfusion method. *Plant Soil*, 139, 239-245. <https://doi.org/10.1007/BF00009315>
- Oelbermann, M., Voroney, R. y Gordon, A. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 359-377. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.001>
- Palm, C. y Sanchez, P. (1990). Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three tropical legumes. *Biotropica*, 22(4), 330-38. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabj668.pdf
- Powell, Y. y Delaney, P. (1998). *Deforestación y cambio en el uso del suelo*. Perspectivas del medio ambiente . ISBN 968-871

- Rajagopal, R. (2004). Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ramachandran, P. (1993). *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/32_An_introduction_to_agroforestry.pdf
- Schroeder, Y. (1994). Carbon storage benefits of agro Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 27, 89-97
- Segura, M. y Kanninen, M. (2002). *Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales*. CATIE.
- Senayake, A. y Gamboa, O. (2003). *Empleo y efecto del fuego en los pastizales*. Actas Jornadas de Cría en Campos de Monte – INTA-Cambio Rural.
- Stevenson, F. (1994). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. John Wiley and Sons.
- Young, A. (1997). *Agroforestry for soil management*. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9780851991894.0000#>

ANEXO

Apéndice 1. Panel fotográfico



Figura 14. Instalación de panel de tesis en la parcela de estudio



Figura 15. Muestreo de hojarasca en parcela con sistema agroforestal de cacao



Figura 16. Muestreo de suelo en parcela con sistema agroforestal de cacao



Figura 17. Muestreo de suelo en parcela con sistema agroforestal de cacao



Figura 18. Muestreo de densidad aparente del suelo en parcela con sistema agroforestal de cacao



Figura 19. Extracción de muestras de suelo



Figura 19. Muestreo de necromasa en parcela agroforestal de cacao