

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



CARBONO ALMACENADO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE *Coffea arábica*
(CAFÉ) EN LA DIVISORIA

Tesis

Para optar el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:

VANESSA PÉREZ MEZA

Asesor

JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

Tingo María - Perú

2023



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

N° 018-2023-FA-UNAS

BACHILLER : VANESSA PEREZ MEZA

TÍTULO : **"Carbono almacenado en un sistema agroforestal de *Coffea arabica* (Café) en La Divisoria"**

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE
VOCAL : M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL : M.Sc. MARCO ANTONIO DUEÑAS TUESTA

ASESOR : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 07/07/2023

HORA DE SUSTENTACIÓN : 04:00 P.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : SALA AUDIVISUAL DE LA F.A

CALIFICATIVO : BUENO

RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 07 DE JULIO DE 2023

.....
Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE
PRESIDENTE

.....
M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL

.....
M.Sc. MARCO ANTONIO DUEÑAS TUESTA
VOCAL

.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
ASESOR



"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 219- 2023 - 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:

Agronomía

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTEMICOS Y CARBONO ALMACENADO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE Coffea arábica (CAFÉ) EN LA DIVISORIA Tesis	VANESSA PÉREZ MEZA	18 % Dieciocho

Tingo María, 10 de agosto de 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACION

 Dr. Tomás Menacho Mallqui
 DIRECTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



CARBONO ALMACENADO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE *Coffea arábica*
(CAFÉ) EN LA DIVISORIA

Autor	: Pérez Meza, Vanessa
Asesor	: Dr. Zavala Solórzano, José Wilfredo
Programa de investigación	: Suelos y fertilizantes
Línea de investigación	: Servicios ecosistémicos descontaminación del suelo y el medio ambiente.
Eje temático	: Almacenamiento de carbono en Café
Lugar de ejecución	: Campo agrícola de café en la Divisoria
Duración	: 06 meses
Financiamiento	: Propio

Tingo María - Perú, Agosto 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Agronomía
Título de Tesis	: “Carbono almacenado en un sistema agroforestal de <i>Coffea arábica</i> (Café) en La Divisoria”
Autor	: Pérez Meza, Vanessa
DNI	: 23014595
Correo electrónico	: vanessa.perez@unas.edu.pe
Asesor	: José Wilfredo Zavala Solórzano
Escuela Profesional	: Agronomía
Programa de Investigación	: Suelos y Fertilizantes
Línea (s) de Investigación	: Servicios ecosistémicos descontaminación del suelo y el medio ambiente.
Eje temático de investigación	: Almacenamiento de carbono en café
Lugar de Ejecución	: Fundo Agrícola-Facultad de Agronomía
Duración del trabajo	: 6 meses
Fecha de Inicio	: Febrero
Término	: Julio
Financiamiento	:
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María - Perú – Agosto 2023

DEDICATORIA

A Dios:

Divino Hacedor, quien me dio la oportunidad de expresarme en este mundo, quien me dio la oportunidad del aprendizaje.

A mis padres:

Seres humanos a quien debo el cúmulo de valores que hoy pregonó, los impulsores primarios de mi vida; dedico esta investigación a su amor inquebrantable y sus buenos deseos.

A mis hermanos

Fieles compañeros de aventuras, quienes fueron cómplices de mis primeras muestras de aprendizaje, quienes me apoyaron incondicionalmente en este periplo que significa la vida.

A los docentes:

Por su calidad como profesionales y mentores, por su enorme sacrificio en la enseñanza universitaria, por su contribución al desarrollo de nuestra nación.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, la cual a través de la Facultad de Agronomía me ha permitido alcanzar uno de mis apreciados anhelos.
- A los docentes de la Facultad de Agronomía, por su enorme contribución al desarrollo agrario de nuestro país a través de la enseñanza a los pilares de desarrollo.
- A los miembros del jurado de tesis, Dr. Victorino Rivas Pulache, como presidente y los M. Sc. Jaime J. Chávez Matías y Marco A. Dueñas Tuesta en calidad de miembros; por sus invaluable aportes y por la revisión del presente trabajo de investigación.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, asesor de la presente investigación, por su inigualable apoyo, por su importante opinión en relación al diseño de la investigación, por su apoyo incondicional en toda la ejecución y redacción del trabajo de investigación.
- A mis compañeros y colegas, por su compañía inigualable, gracias por el apoyo que me brindaron con sus palabras, con sus acciones.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. El carbono.....	3
2.2. Bondades del café: el café y el ambiente.....	3
2.3. Problemática de la emisión de carbono	4
2.3.1. Dióxido de carbono	4
2.3.2. Efecto invernadero	4
2.3.3. Causas y consecuencias del cambio climático global	5
2.4. Fijación de carbono por los vegetales.....	5
2.5. Fijación de carbono en el suelo	6
2.5.1. Formas de carbono en el suelo	8
2.6. Métodos para estimar la cantidad de carbono existente en los vegetales	9
2.6.1. Método destructivo.....	9
2.6.2. Método alométrico	9
2.7. Reportes del trabajo de investigación en fijación de carbono en el cultivo de café	10
2.8. Almacenamiento de carbono	15
2.9. Sistemas agroforestales.....	16
2.10. Servicios ecosistémicos	18
2.10.1. Clasificación de los servicios ecosistémicos.....	19
2.10.2. Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1. Lugar de ejecución.....	21
3.1.1. Características climáticas	21
3.1.2. Características del suelo	22
3.2. Material y métodos	22
3.2.1. Materiales y equipos	22

3.2.2. Metodología	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1. Carbono almacenado en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal	31
4.2. Carbono almacenado en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal	37
4.3. Carbono total almacenado en el cultivo de café como sistema agroforestal	40
4.4. Determinación de los servicios ecosistémicos en el cultivo de café como sistema agroforestal	42
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	49
VII. REFERENCIAS.....	50
ANEXOS.....	60

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Prueba de Shapiro-Wilk para el carbono almacenado (t.ha-1) en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal	31
2. Prueba t de Student ($\alpha=0,05$) para el carbono almacenado (t.ha-1) en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal.....	32
3. Valores máximos, mínimos y media del contenido de carbono en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal	32
4. Prueba de Shapiro-Wilk para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal.....	37
5. Prueba t de Student ($\alpha=0,05$) para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal.....	38
6. Valores máximos, mínimos y media para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal	38
7. Valores promedio para el carbono total en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	41
8. Valores promedio para el carbono total en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	42
9. Color del suelo registrado dentro de la parcela del cultivo de café como sistema agroforestal.....	44
10. Valores de temperatura, humedad relativa y luminosidad dentro y fuera de la parcela del cultivo de café como sistema agroforestal.....	46
11. Biomasa y carbono del componente arbóreo de la parcela de café en Río Azul	61
12. Biomasa y carbono en los cafetos de la parcela de café en Río Azul	62
13. Biomasa y carbono herbáceo-arbustivo de la parcela de café en Río Azul	67
14. Biomasa y carbono de la hojarasca de la parcela de café en Río Azul	67
15. Biomasa y carbono radicular de la parcela de café en Río Azul.....	68
16. Densidad aparente, peso del volumen seco y carbono del suelo de la parcela de café en Río Azul	70
17. Características de la temperatura, humedad relativa y luminosidad en la parcela de café en Río Azul.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ciclo de carbono en la biósfera y valores expresados en gigatoneladas de carbono	.3
2. Resumen del ciclo de Calvin con énfasis en las fases de carboxilación, reducción y regeneración.6
3. Modelo de cascada para los servicios ecosistémicos de acuerdo a la CICES.....	20
4. Detalle de parcela con los ocho transectos internos.....	24
5. Detalle de parcela para la medición del carbono en las especies arbóreas y cafetos .	24
6. Detalle de cuadrantes de 1m x 1m para medición del carbono en material herbáceo, arbustivo y raíces	25
7. Detalle de cuadrantes interiores de 0,5m x 0,5m para la medición del carbono en la hojarasca.....	26
8. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en la biomasa vegetal de especies forestales en el cultivo de café como sistema agroforestal	33
9. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en los cafetos en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	34
10. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en las herbáceas-arbustos en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	35
11. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en la hojarasca en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	36
12. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en las raíces en el cultivo de café como sistema agroforestal.....	37
13. Contenido de carbono (t. ha ⁻¹) en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal.....	39
14. Densidad del suelo (g.cc ⁻¹) del cultivo de café como sistema agroforestal	40
15. Peso del volumen (t. ha ⁻¹) del suelo del cultivo de café como sistema agroforestal..	40
16. Contenido de carbono total (t.ha ⁻¹) en el cultivo de café como sistema agroforestal	41
17. Evaluación de diámetro de la planta de café.....	74
18. Cuadrantes de 1m x 1m para medición del carbono en material herbáceo, arbustivo y raíces.....	74
19. Cuadrantes interiores de 0.5m x 0.5m para la medición del carbono en la hojarasca.....	75
20. Muestras de suelo para estimar la densidad aparente del suelo.	76

21.	Arboles forestales del transecto.	76
22.	Toma de datos con el Luxómetro.	77
23.	Coordenadas UTM de la parcela.	77
24.	Toma de datos con el Higrómetro.	78
25.	Evaluación de peso seco de las muestras.	78
26.	Determinación del color de suelo de la parcela.	79
27.	Muestras de suelo determinación de la M. O.	79

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la zona de Río Azul, Hermilio Valdizán, en un sistema agroforestal de café de la variedad Caturra de 12 años, para esto se planteó como objetivo evaluar el carbono almacenado en la biomasa vegetal y el suelo de la zona, así como los servicios ecosistémicos que brinda el sistema agroforestal de café con sus árboles de sombra. Para esto se planteó una investigación descriptiva no experimental, teniéndose como variables dependientes a la biomasa y carbono de las especies arbóreas, las plantas de café, herbáceas y arbustos, raíces hojarasca, así como el carbono en el suelo a diferentes profundidades. Para esto se delimitó 08 transectos de 100 m² tomando como metodología principal la mencionada por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF), en cada transecto se evaluó a través de los monolitos la densidad aparente el carbono orgánico y la presencia de humus, así mismo se determinó la temperatura, la precipitación, la humedad relativa la radiación o cantidad de luz, comparando dentro y fuera de la parcela. Los resultados obtenidos nos muestran que la cantidad de carbono en la biomasa vegetal detalla un valor de 47,98 t C.ha⁻¹ para las especies forestales; en los cafetos se registra en promedio 1,09 t C.ha⁻¹, las herbáceas y arbustos registran 0,81 t C.ha⁻¹, para el caso de la hojarasca se tiene 5,66 t C.ha⁻¹ y en las raíces en promedio se concentran 0,92 t C.ha⁻¹ en promedio. Para el caso del suelo se estima una densidad aparente de 1 116 g.cc⁻¹; asimismo, se concentran 100,61 t. ha⁻¹ de C en la estructura de suelo el cual alcanza un peso del volumen del suelo de 1 116, 44t.ha⁻¹. Finalmente, la cantidad total estimada fue de 157,07 t C. ha⁻¹. Con respecto a los servicios ecosistémicos se verificó el aporte de materia orgánica en las parcelas con SAF café y árboles de sombra, con menores temperaturas y mayores niveles de humedad y menor cantidad de luminosidad generando un microclima favorable.

Palabra clave: Agroforestal, biomasa, carbono y ecosistémicos.

ABSTRACT

The present investigation was carried out in the area of Río Azul, Hermilio Valdizán, in an agroforestry system of coffee of the Caturra variety of 12 years old. The objective was to evaluate the carbon stored in the plant biomass and soil of the area, as well as the ecosystem services provided by the agroforestry system of coffee with its shade trees. For this purpose, a descriptive non-experimental research was proposed, having as dependent variables the biomass and carbon of the tree species, coffee plants, herbaceous and shrubs, leaf litter roots, as well as the carbon in the soil at different depths. For this purpose, 08 transects of 100 m² were delimited taking as main methodology the one mentioned by the International Center for Research in Agroforestry (ICRAF), in each transect the bulk density, organic carbon and the presence of humus were evaluated through the monoliths, as well as the temperature, precipitation, relative humidity, radiation or amount of light, comparing inside and outside the plot. The results obtained show that the amount of carbon in the vegetal biomass details a value of 47,98 t C.ha⁻¹ for the forest species; in the coffee trees there is an average of 1,09 t C.ha⁻¹, the herbaceous and shrubs register 0,81 t C.ha⁻¹, in the case of the leaf litter there is 5,66 t C.ha⁻¹ and in the roots there is an average concentration of 0,92 t C.ha⁻¹ on average. In the case of the soil, a bulk density of 1 116 g.cc⁻¹ is estimated; likewise, 100,61 t. ha⁻¹ of C are concentrated in the soil structure, which reaches a soil volume weight of 1 116,44 t. ha⁻¹. Finally, the total estimated amount was 157,07 t C. ha⁻¹. With respect to ecosystem services, the contribution of organic matter was verified in the plots with brown PBS and shade trees, with lower temperatures and higher levels of humidity and less luminosity, generating a favorable microclimate.

Keyword: Agroforestry, biomass, carbon and ecosystems.

I. INTRODUCCION

Existe un enorme potencial forestal para capturar secuestrar y almacenar carbono y contribuir a reducir emisiones de los GEI a través del manejo de bosques, tal como la conservación de bosques, forestación, reforestación, sistemas agroforestales, sistemas agrosilvopastoriles y plantaciones de café, Principalmente bajo sistemas agroforestales entre cacao y árboles de sombra que brindan servicios ambientales o ecosistémicos, como el secuestro captura y almacenamiento de carbono, principalmente en el suelo y en las plantas (Zavala, 2015). Las plantaciones de café ocupan más de 2 millones de hectáreas en tres continentes (África Asia y América) y en el Perú aproximadamente 20 000 ha. Por consiguiente, parecieran ser candidatas de elección para capturar Carbono en los países tropicales. Además, en un futuro podrían ser elegibles para proyectos aceptados dentro el mecanismo de desarrollo limpio MDL (Acosta et al., 2002).

El pago de incentivos a los agricultores cuyos usos de tierra protegen los recursos naturales y así proveen un servicio a la comunidad local, nacional y mundial, es una nueva opción que podría mejorar la viabilidad financiera de las fincas o chacras. Es oportuno enfatizar y revisar la cantidad y valor de los servicios ambientales que prestan los sistemas agroforestales siendo estos servicios, la conservación del suelo, conservación de la calidad del agua, captura de Carbono (cambio climático) y conservación de la biodiversidad. Los árboles de sombra en cultivos perennes (p. ej., café y cacao) aportan hojarasca y residuos de podas que cubren el suelo, reduce el impacto de las gotas de la lluvia, la velocidad de escorrentía y la erosión, mejoran la estructura, el contenido de N y la retención de nutrientes en el suelo (Beer et al., 1998).

Los servicios ambientales que proveen los sistemas agroforestales (conservación del suelo, captura de carbono, calidad de agua y conservación de la biodiversidad) están ganando la atención de investigadores, planificadores y políticos. Sin embargo, debido a que estos beneficios se obtienen a mediano y largo plazo y no son tangibles para los productores y/o los beneficiarios se encuentran más allá de los límites de las fincas, la conservación/adaptación de los SAF puede ser limitada severamente (Acosta et al., 2002). De acuerdo al informe situacional actual del cultivo de café, donde todas las plantaciones se encuentran por lo general establecidos en paisajes colinosos (que corresponden a suelos coluvio aluvial) y en montañas (Suelos residuales); Por lo tanto, se formula la siguiente pregunta; Cuánto es la cantidad de carbono secuestrado y almacenado en sistemas agroforestales con *Coffea arábica* (Café) en los sistemas agroforestales de café y cacao con diferente edad y establecidos en diferentes unidades

fisiográficas que secuestran y almacenan mayor cantidad de carbono considerando su edad (Zavala, 2015).

Es por ello que el presente trabajo se planteó como objetivo general, determinar qué cantidades de carbono almacenan estos sistemas agroforestales con café de altura, y los servicios ambientales o ecosistémicos que proveen los sistemas agroforestales (SAF's) de café. Esto nos permite contar con un instrumento para investigaciones futuras, para el establecimiento e implementación de servicios ambientales, como el almacenamiento de carbono, a través de la instalación de SAF's

Objetivo general:

1. Evaluar el carbono almacenado en un sistema agroforestal de *Coffea arábica* (Café) en la zona de la Divisoria.

Objetivos específicos:

1. Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa vegetal del cultivo de *Coffea arábica* (Café) como sistema agroforestal en la zona de la Divisoria.
2. Estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo del cultivo de *Coffea arábica* (Café) como sistema agroforestal en la zona de la Divisoria.
3. Estimar el contenido de carbono total en el cultivo de *Coffea arábica* (Café) como sistema agroforestal en la zona de la Divisoria.
4. Evaluar los servicios ambientales o ecosistémicos que brinda la parcela del sistema agroforestal café con árboles de sombra.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El carbono y ciclo del carbono.

El carbono es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo (Figura 1). Estos son considerados depósitos (Reservorios) de carbono. Está relacionado con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos.

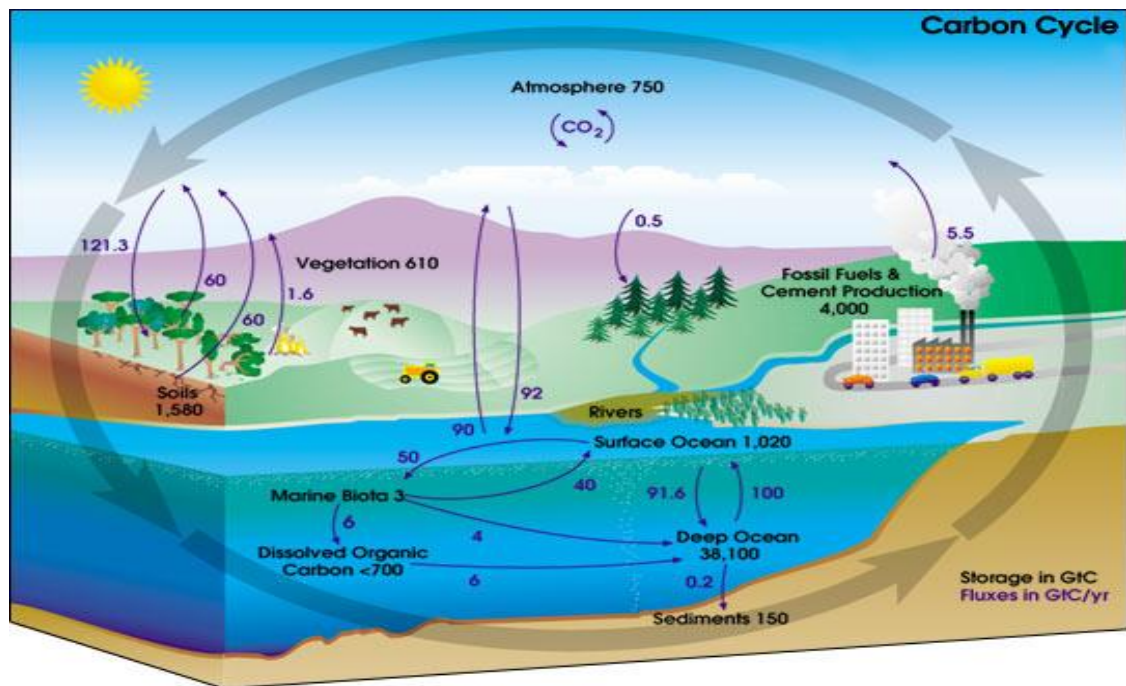


Figura 1. Ciclo de carbono en la biosfera y valores expresados en gigatoneladas de carbono

El suelo bajo condiciones de cultivo convencional es una fuente de CO_2 para la atmósfera. Este carbono orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al carbono elemental (Martínez et al., 2008).

2.2. Bondades del café: el café y el ambiente

Chávez (2006), menciona que cuando se siembra un árbol de café, se contribuye a la reforestación debido a que el ecosistema del café, cuando se compara con otros ecosistemas naturales de los trópicos húmedos, tiene una tasa neta anual de producción de biomasa igual o aun mayor que el bosque tropical. El café a diferencia de un cultivo anual de escarda, que deja el suelo más o menos desnudo durante varios meses tiene la cualidad de convertirse en un bosque tropical artificial, al cosechar cortando los frutos, y efectuar las podas se genera hojas, ramas y rastrojos que se incorporan al suelo, formando humus, siendo una importante fuente de

nutrientes para abonar la plantación, reduciendo el uso de fertilizantes sintéticos y minerales, así mismo todas las partes del café se utilizan, por lo tanto, no hay desperdicios que contaminen.

2.3. Problemática de la emisión de carbono

2.3.1. Dióxido de carbono

Unep y Gens (1992), suscriben que el dióxido de carbono gaseoso está formado por la combinación de dos elementos: carbono y oxígeno. Se forma por la combustión de carbón o hidrocarburos, la fermentación de materia orgánica, y por la respiración de hombres y animales. Se encuentra en bajas concentraciones en la atmósfera, y es asimilado por las plantas, que en su lugar producen oxígeno. El CO₂ gas tiene un ligero olor irritante, es incoloro, y más pesado que el aire.

2.3.2. Efecto invernadero

Centeno (1992), menciona que un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta es causado por la presencia de gases en la atmosfera, principalmente vapor de agua y gas carbónico, permitiendo la retención de parte de la energía calórica que recibe del sol, y el mantenimiento de una temperatura dentro de límites que han permitido el desarrollo de la vida como la conocemos. Sin la concentración natural de estos gases en la atmosfera, la temperatura promedio en la superficie de la tierra sería similar a la de la luna, unos 18° C bajo cero. Los gases del efecto invernadero permiten el paso de las radiaciones solares de onda corta, calentando la superficie de la tierra. A la vez absorben parte del calor que emana de la superficie de la tierra, en forma de radiaciones infrarrojas, de mayor longitud de onda, manteniendo una temperatura en la superficie del planeta de aproximadamente 15° C.

Centeno (1992); Houghton y Woodwell (1989), mencionan que el efecto invernadero no es por sí mismo, una amenaza a la vida en la tierra. El problema actual radica en que la actividad humana ha aumentado la concentración de CO₂ y otros gases en la atmosfera, debido a la quema deforestación, parque automotor, incendios, industrias, etc., y por ello una mayor cantidad de energía calórica solar tiene así a permanecer atrapada en la atmósfera, elevando la temperatura promedio del planeta.

Centeno (1992); Andrasko (1990) y la PNUD (1997), mencionan que los principales gases producto de la actividad humana, que contribuyen a la amplificación del efecto invernadero, son el dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos (N₂O), los cloro-fluorocarbonados (CFCS), óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O₃).

2.3.3. Causas y consecuencias del cambio climático global

(Intergovernmental Panel On Climate Change [IPCC], 2004) hace referencia que las consecuencias del cambio climático son todos aquellos cambios en el ambiente físico o de la biota resultantes del cambio climático que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a ordenación, o en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos y en la salud y bienestar humano. El papel intergubernamental de cambio climático estima que un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero que duplique las concentraciones de (CO₂) con respecto al nivel preindustrial daría como resultado un incremento de temperatura entre 1,5 a 3.5°C.

Ordoñez (1999), menciona que el cambio de temperatura provocaría a su vez:

- Cambios en los patrones mundiales de precipitación pluvial.
- Elevación del nivel del mar de 0,2 a 0,6 metros, tanto por la expansión térmica de los océanos como por el derretimiento parcial de los glaciares en las montañas y de la capa de hielo en las regiones polares.
- Cambios en la humedad del suelo al aumentar la evaporación del agua.
- Cambios en los sistemas de vientos regionales los cuales a su vez influirían en la distribución pluvial a nivel global e incrementarían la frecuencia de inundaciones, sequías e incendios forestales y huracanes, tormentas de viento y de nieve ocurrirían con mayor frecuencia e intensidad.
- La muerte y destrucción de grandes extensiones de arrecifes coralinos por el incremento de las temperaturas marinas.
- El crecimiento y desarrollo anormal de varias poblaciones de insectos, las cuales producirían efectos negativos en la agricultura y la salud humana.
- Aumento en la propagación e incidencia de enfermedades tropicales como es la malaria.

2.4. Fijación de carbono por los vegetales

Salisbury (1999), indica que se descubrió una enzima que cataliza de manera irreversible la combinación del CO₂ con la RUBP para formar dos moléculas de 3-PGA. Esta es una reacción de extraordinaria importancia. Se forma un intermedio inestable el cual con la adición de agua se fragmenta en dos 3-PGA.

Sobre el ciclo de Calvin señala que en el estroma de los cloroplastos existen tres procesos como: carboxilación, reducción y regeneración, como se explica más adelante y se resume en la Figura 1. La carboxilación implica la incorporación de CO y la RuBP para formar

dos moléculas de 3-PCA. En la fase de reducción, el grupo carboxilo del 3-PGA, se reduce a un grupo aldehído del 3 (3-P) Gliceraldehído, como se muestra en la Figura 2.

Zavala (2015), indica que el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea se obtuvo en los sistemas agroforestales mayor de 16 años del cacao con 285,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal entre 8 y 16 años, con 116,23 t C/ha y el menor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea del sistema agroforestal menor de 8 años con 88,75 t C/ha.

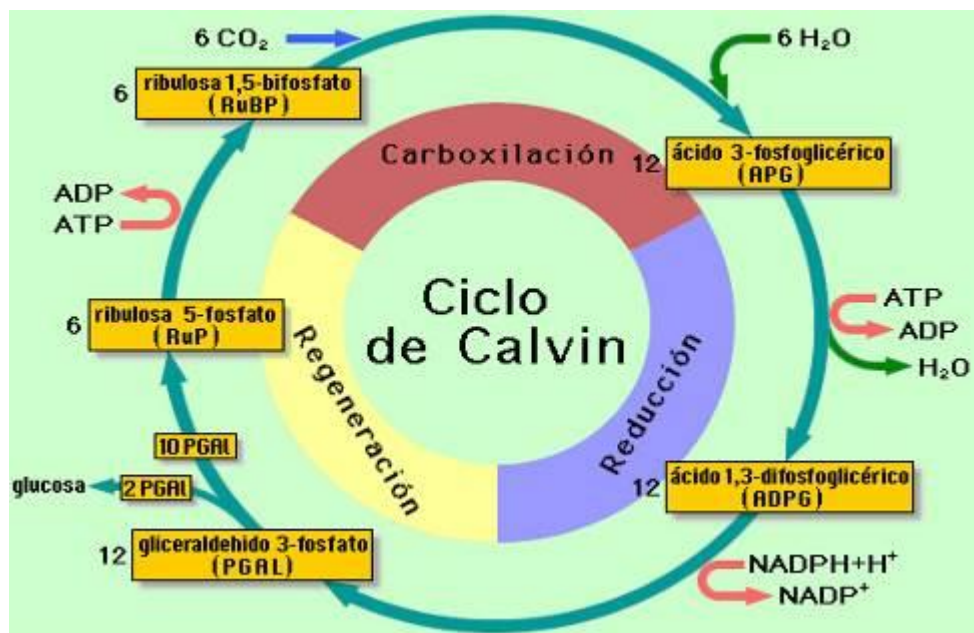


Figura 2. Resumen del ciclo de Calvin con énfasis en las fases de carboxilación, reducción y regeneración.

2.5. Fijación de carbono en el suelo

La (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación [FAO], 2002) menciona que las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (Humificación y mineralización).

Houghton y Woodwell (1989), estiman que las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra deforestación e incremento del pastoreo y de las tierras cultivadas fueron cerca de 140 Pg entre 1 850 y 1 990 (de 0,4 Pg/año en 1 850 a 1,7 Pg/año en 1 990), con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono. De acuerdo con IPCC (2004), la pérdida histórica de los suelos agrícolas fue de 50 Pg de carbono en el último medio siglo, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación. En condiciones aeróbicas

del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y sola una pequeña fracción (1 %) del que ingresa (55Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año). La materia orgánica del suelo tiene una composición muy compleja y heterogénea y está por lo general mezclada o asociada con los constituyentes minerales del suelo. Se han desarrollado un gran número de métodos de separación para identificar los distintos constituyentes de la materia orgánica del suelo, grupos cinéticos, por ejemplo: grupos que pueden ser definidos por una cierta tasa de recambio del carbono.

El sistema tradicional de separación en fracciones fúlvicas y húmicas no separa las fracciones con diferentes tasas de recambio como se considera en los modelos (Balesdent 1996). Los métodos de separación física tales como el fraccionamiento según el tamaño de las partículas, la densidad de las fracciones o las fracciones por tamaño de los agregados permiten la separación de fracciones cinéticas significativas. Entre estas fracciones, las partículas de materia orgánica son muy sensibles a los cambios en el uso de la tierra (Cambardella, 1998; Gregorich et al., 1996). Existen algunos métodos directos para determinar la biomasa microbiana, la cual representa de uno a cinco por ciento del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente de reserva de nutrientes (Nitrógeno y fósforo). Esta es una fracción muy lábil que fluctúa con la estación y que también responde rápidamente a los cambios de manejo del suelo. Los métodos de isótopos tales como el carbono 14 o la abundancia natural del carbono 13 son muy valiosos ya que permiten una estimación del tiempo de residencia de la materia orgánica y sus fracciones en el suelo. La abundancia del carbono 13 natural es adecuada para las tasas de recambio para periodos de años a siglos y el carbono 14 para periodos de siglos a milenios. Ambos pueden ser aplicados a muestras masivas de suelos o a fracciones aisladas de los mismos. El método de las abundancias de carbono 13 natural puede ser usado solamente si en ese sitio ha ocurrido un cambio de vegetación de un tipo fotosintético C3 a un tipo C4 o viceversa.

La FAO (1998), también manifiesta que la gran ventaja de los métodos isotópicos radica en que la tasa de recambio de la materia orgánica puede ser medida de modo que puede deducir directamente el tiempo de residencia de los diferentes compartimientos. Cuando hay un cambio importante en la vegetación (Bosques/cultivos/pasturas) es posible seguir la evolución de los distintos tipos de residuos de las plantas.

Al mismo tiempo manifiesta que los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos medios de residencia variando de uno a pocos años, dependiendo de la composición bioquímica, por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa, a décadas o más de 1 000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con

la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas. Para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o química o captura: protección física significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por los macro/o micro agregados del suelo (Puget et al., 1995); protección química se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo (Coloides o arcillas), pero más a menudo esto concierne compuestos orgánicos del suelo muy estables. Sin embargo, el término captura de carbono tal como se usa en el protocolo de Kyoto no toma en consideración esas distinciones y es equivalente al término almacenamiento de cualquier forma de carbono.

También indica que los diferentes grupos de materia orgánica en los suelos son influenciados por distintos factores. Las partículas de materia orgánica libre y la biomasa microbiana de los suelos son controladas por el aporte de residuos y el manejo de residuos de cultivos o cobertura del suelo, y el clima. La agregación del suelo, la textura y la mineralogía controlan la materia orgánica en macro agregados y, por lo tanto, la labranza tiene un gran efecto sobre el tamaño de esos reservorios. Los otros reservorios son menos afectados por los factores agronómicos, pero lo son sobre todo por factores pedológicos (micro agregación, composición de la arcilla).

2.5.1. Formas de carbono en el suelo

Jackson (2004), indica que el carbono se encuentra en los suelos formando parte de cuatro tipos de materiales orgánicos y minerales como los Carbonatos minerales, principalmente CaCO_3 y MgCO_3 ; pero se presenta también pequeñas cantidades muy activas e importantes de CO_2 y también de HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$, iones derivados de los carbonatos más solubles; Las formas muy condensadas de composición próximas al carbonato elemental (Carbón vegetal, grafito, carbón de hulla); Los residuos de las plantas, animales y microorganismos, alterados y bastantes resistentes, denominados a veces “Humus” y “Humatos”, que no constituyen un compuesto único, al contrario de lo que parece sugerir estas denominaciones y residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y de microorganismos vivos y muertos, que sufren descomposiciones bastante rápidas en los suelos. Evidentemente el carbono total de los suelos incluye estas cuatro formas, el carbono orgánico total incluye las tres últimas, siendo eliminadas las formas minerales por lavado de un ácido reductor diluido antes de la determinación del carbono orgánico. La determinación más reproducible del carbono orgánico es la que incluye las tres formas en que se presenta sin intentar su fraccionamiento. La materia orgánica químicamente activa se encuentra relacionada con la génesis del suelo y su fertilidad, incluye las formas 3 y 4. Por ello algunas veces se

realizan esfuerzos para eliminar la forma 2, el carbono en forma fuertemente condensada, de las determinaciones de materia orgánica del suelo.

Zavala (2015), afirma en cuanto al carbono en el suelo, que no encontró diferencias significativas entre los sistemas evaluados, de edades en diferentes unidades fisiográficas, sin embargo, el sistema agroforestal con cacao menores de 8 años presentó la mayor reserva de carbono en el suelo con 66,16 t C/ha, seguido por el sistema agroforestal de 8 a 16 años con 62,38 t C/ha mientras que el sistema agroforestal mayor de 16 años presenta la menor reserva con 59,08 t C/ha. Asimismo, menciona que la mayor cantidad de carbono orgánico del suelo está en la primera capa u horizonte del suelo entre 0 a 10 cm. Siendo mayor en el SAF Cacao menores de 8 años con 28,36 tC/ha, seguido del Cacao mayores de 16 años con 27,74 tC/ha y de 8 a 16 años con 27,11 tC/ha.

2.6. Métodos para estimar la cantidad de carbono existente en los vegetales

Según Hernández (2001), existen dos métodos para calcular la biomasa de los datos que estén disponibles al momento de realizar la estimación:

2.6.1. Método destructivo

Método que utiliza datos colectados a partir de las mediciones destructivas de la vegetación en una unidad de superficie determinada. Por su alto costo, generalmente no se aplica.

2.6.2. Método alométrico

Cuando se mide una parte del individuo para inferir el C total. Como una primera aproximación se estimaron a partir de datos de volumen de fuste y valores de densidad de biomasa aérea arbórea (BA) de los bosques regionales, aplicando las ecuaciones alométricas desarrolladas por Brown y Lugo (1997), para bosques tropicales húmedo, así como para Bosques muy húmedos pre montanos tropicales. La biomasa aérea arbórea se estima usualmente mediante la aplicación de ecuaciones de regresión alométrica a un conjunto de árboles de una parcela medida.

Este método se puede aplicar de manera general a bosques secundarios y maduros presentes desde climas húmedos y secos. Sin embargo, lo más apropiado es usarlo en bosques densos ya que los datos originales usados para desarrollar el modelo provinieron de tales tipos de bosques (Brown y Lugo, 1997).

2.7. Reportes del trabajo de investigación en almacenamiento de carbono en el cultivo de café

Se tiene diversos estudios relacionados al contenido de carbono en sistemas agroforestales, enfáticamente en aquellos cuyo cultivo agrícola es el café; así, se tiene la investigación de Andrade et al. (2014), quienes estimaron la fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café, en el Líbano, Tolima, Colombia. El estudio se realizó en sistemas de monocultivo, café-plátano, café-nogal cafetero y café-caucho. La forma de determinación fue indirecta, utilizándose ecuaciones alométricas. Para esto se establecieron parcelas de muestreo para la medición de diámetros en cafetos y árboles, así como el valor de la altura del árbol en los cafetos. La biomasa aérea fue determinada mediante modelos disponibles para dichas especies. La tasa media de fijación de carbono para el sistema café-nogal fue el más elevado, alcanzando los 4,37 t C/ha. año. En el estudio se logró identificar que los árboles con dosel de sombra representaron el componente de almacenamiento de carbono más alto con 3,57 y 1,20 t C/ha. año para el nogal y caucho respectivamente, teniéndose una fijación mayor para los sistemas agroforestales con un nivel de sombra del 33 %.

Asimismo, Espinoza et al. (2012), estimaron el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con base en *Coffea arabica* (Café) en la región de Huatusco, estado de Veracruz, México. Se estudió los sistemas de café-plátano, café-macadamia, café-cedro rosado, café-ganado ovino y café-chalahuite, asimismo, se incluyó un potrero con pradera natural y un bosque primario, como referencia para las condiciones no forestales. En cada uno de los sistemas agroforestales se determinó el contenido de carbono en la biomasa vegetal y el carbono orgánico en el suelo. El muestreo de suelo fue realizado a una profundidad de 0 a 30 cm, para la biomasa de la vegetación herbácea y mantillo, las muestras se colectaron y evaluaron en parcelas de 4 x 25 m². Para determinar el carbono aéreo usó modelos alométricos, y según los resultados obtenidos, los sistemas que presentaron mayor almacenamiento fueron el bosque primario y café-cedro rosado. En conclusión, los sistemas agroforestales almacenaron, en promedio, 110 t C.ha⁻¹.

La investigación de Corral et al. (2011), en el Ecuador en un SAF de café y cacao buscó cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas silvoagrícolas, asimismo, determinar el valor económico del servicio ambiental. Los sistemas agroforestales estudiados fueron de 6,5 años de edad y se ubicaron en dos zonas agro ecológicas, Pichilingue (provincia de Los Ríos) y Caluma (Provincia de Bolívar). Los contenidos de carbono se evaluaron a nivel del suelo (0-30 cm) y necromasa, del componente arbustivo: biomasa aérea de las plantas de café y cacao, y del estrato arbóreo: biomasa de los árboles de guaba, pachaco y laurel. Los

resultados permitieron determinar que los suelos de Caluma presentaron una mayor capacidad de almacenamiento de C (92,8 t/ha), en comparación a los suelos de Pichilingue (55,4 t/ha). En contraste, en Pichilingue se determinó una mayor capacidad de captura de C a nivel de la biomasa aérea (151,6 t C/ha), frente a 84,4 t C/ha de Caluma. Los suelos de los SAF con café-cacao, son depósitos de importancia: 72,5 y 75,7 t C/ha, respectivamente; asimismo, los contenidos de C almacenados en el suelo, son el producto del constante flujo de materia orgánica aportado por la biomasa vegetal. A nivel de la biomasa aérea de los cafetos, se determinó un contenido de 4,12 t C/ha mientras que, en los arbustos de cacao fue 1,80 t C/ha, lo que representa el 2,24 % y el 0,92 % del contenido total de carbono en los SAF. La asociación de especies forestales de rápido crecimiento, como el *Shizolobium parahyba* (Pachaco) con café y cacao en SAF, permite incrementar los contenidos de C a nivel de la biomasa que está determinada por la capacidad de crecimiento de los árboles y su capacidad de almacenamientos de carbono.

Castro (2017), en su tesis buscó determinar cuál es el arreglo que presenta los mayores beneficios integrales dentro de un sistema agroforestal en la Zona de los Santos, Costa Rica. Los sistemas estudiados fueron café-Persea americana, café-Grevillea robusta, café-*Erythrina spp.* y café al pleno sol. Mediante un diseño completamente aleatorio y un análisis financiero, se determinó cual combinación almacenó mayor carbono en el sistema y cuál arreglo fue el de mayor rentabilidad. La principal conclusión que refiere es que el modelo de producción de dos cultivos con producciones anuales es mucho más rentable que un cultivo con producción anual en asocio con un cultivo a largo plazo, a pesar de que la última recibe insumos del gobierno para que se establezcan, siempre y cuando se manejen 156 árboles por hectárea.

Abarca (2011), evaluó el carbono almacenado en un sistema agroforestal con café, donde los arbustos obtuvieron 0,8 t ha⁻¹, en hojarasca fue de 1,56 t ha⁻¹. Para el café con 7,42 t ha⁻¹, y en el componente arbóreo con 20,17 t ha⁻¹, siendo superior a todos los demás componentes el contenido de carbono en el suelo con 111,24 t ha⁻¹ representados por el 0,57 %; 1,10 %; 5,26 %; 14,29 % y 78,29 % respectivamente. El total de carbono almacenado en el SAF de café es 141,19 t ha⁻¹.

De igual manera, entre los estudios a nivel nacional se tienen gran diversidad de iniciativas; así, se tiene la investigación de Odar (2018), quien buscó evaluar el almacenamiento de carbono aéreo y porcentaje de carbono del suelo en policultivos de café con diferentes árboles de sombra en terrenos ubicados en el Anexo de Vilaya, incluyendo *Coffea spp* (Café (.)), *Inga spp.* (Guaba) y *Schizolobium spp* (Pashaco). Para esto se consideró cuatro componentes de almacenamiento: biomasa aérea viva (Arboles y café), suelo, hojarasca y maleza. Para

estimar la cantidad de biomasa se usó el método directo a través de la fragmentación, peso seco y peso húmedo de cada uno de sus componentes. Para el café se estableció una ecuación alométrica: $B \text{ (kg)} = 14,928 - 5,319(\text{DAP}) + 0,598(\text{DAP})^2 - 0,019(\text{DAP})^3$, que relaciona a la biomasa aérea seca con el diámetro de la planta, considerando un coeficiente de determinación de 0,947. Los resultados muestran que los sistemas de café-guaba-pashaco almacenaron 26,922 t C/ha, mientras que los de café guaba, 16,305 t C/ha en la biomasa aérea. Adicionalmente, se observó la existencia de correlación altamente significativa entre el porcentaje de carbono del suelo y el porcentaje de nitrógeno (índice de correlación de $r = 0,989$). Finalmente, se observó que los sistemas café-guaba-pashaco presentaron un porcentaje del 2,58 % de carbono en el suelo, mientras que los de café-guaba, 2,51 %.

La tesis de Gonzales (2018), tuvo como objetivo estimar la biomasa y cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de *Coffea arabica* L. “Café” en producción de 4 y 7 años en tres gradientes altitudinales y su rentabilidad económica a través de los indicadores económicos. Para la evaluación de biomasa vegetal en plantas de café y guaba se utilizó la metodología recomendada por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) y para el carbono almacenado en el suelo se obtuvo mediante análisis de suelos por el método de Walkley Black. Por lo tanto los resultados obtenidos, de la biomasa vegetal en J. M. Ugarteche de 4 y 7 años son altos con 73,16; 36,06 t.ha⁻¹ y para carbono fue 73,07; 98,08 t C ha⁻¹ respectivamente; mientras que para la zona Túpac Amaru alcanzaron valores medios con 45,70; 46,26 t ha⁻¹ y 95,88; 57,45 t C ha⁻¹ y en la zona Chipaquillo fueron bajos con 26,17; 27,98 t ha⁻¹ y 74,39; 84,59 t C ha⁻¹, mostrando diferencias estadísticas significativas entre cada componente analizado; en cuanto a los indicadores económicos de Túpac Amaru, Ugarteche y Chipaquillo, el VAN fue 3 283,84; 2 783,30 y 2 031,45 soles; el TIR es 25,22; 23,86 y 21,41 % y el beneficio/costo es de 1,78; 1,66 y 1,48 soles. Por lo que concluyó que la mayor cantidad de carbono almacenado en la edad de 4 años fue mayor en la zona de Túpac Amaru con 98,88 t C ha⁻¹ y en la edad de 7 años fue mayor en J.M. Ugarteche con 84,59 t C ha⁻¹.

La tesis de Del Águila y Caldas (2022), la cual tuvieron como objetivo estimar el nivel de incidencia del sistema agroforestal en los servicios ambientales en el cultivo de café, el sitio de investigación se realizó en las zonas de Bolognesi y Divisoria ubicadas en la ciudad de Aucayacu, región Huánuco, para esto se recolectaron 10 muestras de suelo y 10 muestras entre hojas y frutos de cada zona para la obtención de carbono. Estos fueron llevados al laboratorio y se estimó la fijación de carbono en suelo, hojas y frutos, así mismo se pudo determinar el valor económico de cada muestra tomada. La mayor captura de carbono para la

zona de Bolognesi obtenida fue de 33,4g y para la zona de Divisoria se tuvo 34,6g dando como resultado un valor económico máximo de 9 y 8,8 soles respectivamente. Se concluyó que el sistema agroforestal no incide significativamente en los “Servicios ambientales” con referencia a la capacidad de captura de carbono en el cultivo de café, debido a que se encuentran involucrados otros factores como porcentaje de sombra, nutrientes, abono, etc.

La investigación de Zavala et al. (2018), la cual tuvo como objetivo determinar la cantidad de biomasa y su contenido de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de *Coffea arábica* (café) en la Divisoria; y estimar la captura de carbono en los componentes en cada Sistema de Uso de la Tierra, y el almacenamiento del carbono en un suelo Inceptisols. El trabajo se realizó a través de 03 transectos en el cafetal de 5 hectáreas para luego realizar las evaluaciones correspondientes. Asimismo, la biomasa aérea en árboles vivos fue de 148,10 t. ha⁻¹, la biomasa del café fue de 51,39 t. ha⁻¹, la biomasa de hojarasca 12,49 t. ha⁻¹ y la biomasa arbustiva fue de 7,45 t. ha⁻¹ haciendo una biomasa total en el SAF con café de 219,43 t. ha⁻¹. Asimismo, el carbono almacenado en la biomasa en los arbustos fue de 0,95 t C.ha⁻¹; en las hojarascas de 1,90 t C.ha⁻¹, en el café 8,42 t C.ha⁻¹, en el componente arbóreo 25,17 t C.ha⁻¹ y en el suelo 148,24 t C.ha⁻¹, con un total de carbono almacenado en el SAF con café de 184,68 t C.ha⁻¹. La mayor captura de carbono total almacenado se dio en el ecosistema terrestre (Suelo) con 148,24 t C. ha⁻¹ y la menor captura fue el componente arbustivo con 0,95 t C. ha⁻¹. La edad del cultivo de café es un factor que influye en el secuestro y almacenamiento de carbono, siendo necesario determinar la curva de mayor almacenamiento de dióxido de carbono.

La investigación de Callo et al. (2002), quienes en la Amazonía peruana y durante el segundo semestre del año 2000, evaluaron los volúmenes de carbono secuestrado por seis sistemas agroforestales y/o sistemas de uso de la tierra: bosque primario, bosque secundario, café sombra, silvopastura, pastura y huerto casero (tratamientos), en tres variantes ecológicas (repeticiones): selva alta, media y baja. En lo que se refiere a carbono total, el tratamiento parámetro: bosque primario, reteniendo 465,8 tC·ha⁻¹, supera en 58 % a los SAF's: huerto casero y café+sombra; en 74,3 % al cuarto, SAF silvopastura y 80 % al otro testigo extremo, pastura. Sin embargo, todos estos, más el bosque de regeneración, son estadísticamente iguales e inferiores al bosque primario (P < 0,01). Resultó sumidero estable (P<0,01) y considerable el suelo. Retiene en casi todos los casos –a excepción del bosque primario- más de la mitad del carbono total. Se registró una proporcionalidad inversa entre los sumideros arbóreo y edáfico, función de su grado de cobertura arbórea; los aportes de biomasa herbácea y arbustiva (fresca y hojarasca), son pobres, fluctuando entre el 1 y 2 % y los provenientes de árboles muertos, considerables pero oscilantes en los tratamientos bosque primario, bosque secundario y SAF

café-sombra. Las diferencias de carbono secuestrado se deben exclusivamente a la proporción de la cobertura otorgada por la biomasa arbórea ($P < 0,05$).

Clemente (2022), en su investigación buscó cuantificar y valorizar económicamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de siete sistemas agroforestales establecidos hace más de 16 años en la Estación Experimental Agraria (EEA) San Bernardo. El diámetro de las especies frutales y forestales fue usado como insumo para las ecuaciones alométricas que nos permitió estimar la biomasa y el carbono almacenado en el componente arbóreo de los sistemas agroforestales. Los siete sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo tienen un total de 483,81 Mg de carbono almacenado en su biomasa aérea. Esta cantidad de carbono representa US\$ 13 353,16 en bonos de carbono para el precio del 2020. La *Bertholletia excelsa* Bonpl (Castaña) fue la especie con mayor cantidad de carbono almacenado entre los siete sistemas agroforestales, mientras que el *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (Pashaco) mostró una considerable cantidad de carbono almacenado a pesar de tener solo cinco años de haber sido plantado. Nuestros resultados demuestran que algunas combinaciones de especies forestales y frutales generan una competencia interespecífica que favorece al SAF haciéndolo más productivo en términos de crecimiento y de almacenamiento de carbono.

El mismo autor Clemente (2021), en otra investigación se planteó como objetivo analizar el potencial de la captura de carbono en los sistemas agroforestales en el Perú para lograr una agricultura sostenible económica y ecológicamente con esta técnica agroforestal. La información obtenida refleja mediciones en centros de experimentación y parcelas de agricultores en regiones de la amazonia peruana como: Huánuco, San Martín, Ucayali, Loreto, Pasco, Amazonas, Madre de Dios y Puno. Estos estudios mayormente presentan resultados de evaluaciones de stock de carbono, mas no de captura de carbono como lo indica el título, la captura de carbono debe ser evaluado durante un periodo de tiempo para obtener la cantidad de carbono capturado de la atmosfera en una unidad de espacio y por una unidad de tiempo (Mg/ha/año). Resaltan los sistemas agroforestales de Huánuco y Loreto, el primero con un stock de carbono de 344,24 Mg/ha en un sistema agroforestal de *Theobroma cacao* (Cacao) y otras especies forestales de más de 16 años y el segundo con 288,98 Mg/ha en un sistema agroforestal de *Bertholletia excelsa* (Castaña), *Poraqueiba sericea* (Umari), *Cedrelinga cateniformis* (Tornillo) y *Senna multijuga* (Pashaco) sin edad conocida. Además, existe una falta de estandarización de metodologías en la estimación de carbono sobre y debajo del suelo, para poder realizar comparaciones y estudios a una mayor escala. La autora concluye que los sistemas agroforestales representan la mejor opción en el secuestro de carbono después de los

bosques naturales y presentan una tecnología económica y ecológicamente sostenible, la cual se busca en la actualidad para evitar los efectos de la deforestación y el calentamiento global. Proponemos a estos sistemas como solución frente al avance de tierras degradadas por la agricultura tradicional de corte y quema, procurando mayor investigación de todos sus aspectos y componentes, para dilucidar los procesos elementales que impulsan o limitan el uso de los sistemas agroforestales.

2.8. Almacenamiento de carbono

Ríos (2007), menciona que los bosques desempeñan una función importante en la moderación del flujo neto de gas de efecto invernadero (GEI) entre la tierra y la atmósfera. Los bosques actúan como depósitos, almacenando carbono en la biomasa y los suelos. Actúan como sumideros de carbono cuando se aumenta su superficie o su productividad, dando origen a un incremento de la absorción de CO₂ atmosférico. Por el contrario, actúan como fuente de GEI cuando la quema y la descomposición de la biomasa y las alteraciones del suelo dan origen a emisiones de CO₂ y otros GEI. En la actualidad, el 20 por ciento aproximadamente de las emisiones antropogénicas mundiales de CO₂ se deben a cambios en el uso de la tierra, sobre todo por la deforestación que tiene lugar principalmente en las zonas tropicales.

Márquez (2005), indica que el carbono acumulado por unidad de superficie es muy variable según el tipo y estado del bosque. Destacan los bosques siempre verdes adultos, donde el carbono total alcanza 606,80 MgC/ha, con la siguiente distribución: 283,75 MgC/ha en la biomasa aérea; 79,92 MgC/ha en raíces (diámetro > 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 acumulado en los suelos supera en todos los casos estudiados 140 MgC/ha, tomando en cuenta que se consideraron los primeros 30 centímetros de profundidad de suelo ya que, aunque se encuentra materia orgánica hasta los 120 cm se estima que los cambios que se puedan producir más allá de los 30 cm no son significativos. Márquez (2005), añade que los principales almacenes de Carbono en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Los bosques del mundo (Templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo. De igual manera, el suelo juega un papel muy importante en el ciclaje y almacén del carbono en estos ecosistemas y tiene una gran capacidad de "Secuestrar" carbono ya que puede acumularlo por miles de años.

Ordoñez (1999), menciona que la intervención humana en los bosques, cuyas áreas vienen siendo utilizadas actualmente para diversos cultivos, resulta interesante evaluar

los niveles de fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cultivo para conocer su grado de eficiencia y poder valorar mejor su contribución no solo en la producción de alimentos, sino también como agente activo para disminuir los niveles de carbono en la atmosfera, actuando benigneamente a favor de la conservación ambiental. Uno de éstos y que viene actualmente incrementándose, sin lugar a dudas es el café, cuya tendencia al manejo orgánico, estimula más que nunca a los productores a buscar el mayor grado de armonía con la naturaleza, hecho favorable para que estos puedan desempeñar cada vez más una labor importante en la captura y almacenamiento del carbono atmosférico.

2.9. Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales, según Leblanc et al. (2006), se pueden definir como una serie de tecnologías de uso de la tierra, en la que se combinan árboles con cultivo y/o pastos, en función del tiempo y espacio, para incrementar y/o optimizar la producción en forma sostenida. Hablamos de árboles asociados a cultivos agrícolas (sistemas agroforestales), arboles asociados a pasturas (sistemas agrosilvo-pastoriles) y arboles asociados con fines de restitución de la vegetación (sistemas agroforestales secuenciales). El principio radica esencialmente en que el árbol, asociado a determinado cultivo o crianza, contribuye al mejoramiento o conservación de la fertilidad de los suelos y del micro clima, además de brindar otros aportes económicos y ecológicos al medio ambiente, la semejanza al sistema ecológico del bosque, hace que los sistemas sean más adaptados a la ecología que los sistemas de producción a campo abierto. En la agroforestería se combinan las actividades tradicionales de la agricultura y la ganadería, con la actividad silvícola. Los principios que permiten efectuar esta combinación son: Sostenibilidad de la producción, aplicabilidad de las sinergias naturales de las especies vegetales, utilidad de las simbiosis entre especies y en la naturaleza predominan la interacción y convivencia de diferentes especies en una misma área.

Lo anterior permite establecer que el objetivo principal de la agroforestería es el manejo integrado de especies forestales como forma de uso del suelo, donde existe la interacción ecológica y productiva con la combinación de especies agrícolas y/o animales, de manera simultánea en una misma unidad de terreno, lo cual trae consigo beneficios como: Generar biodiversidad en las unidades productivas rurales, diversificar la producción, disminuir los riesgos de los monocultivos, favorecer el desarrollo de las diferentes especies productivas mediante la utilidad de bienes y servicios de otras, aumentar las posibilidades socio-económicas de las poblaciones rurales, integrar el conocimiento tradicional con las técnicas agrícolas desarrolladas, conservar los suelos, y mitigar parte de los efectos perjudiciales de factores climáticos como la radiación solar, la lluvia, el viento.

Márquez (2005), indica que la combinación de cultivos, árboles y/o animales da paso a una serie de interacciones complementarias y competitivas. Entre las actividades complementarias se encuentran el reciclaje de nutrientes, protección contra factores climáticos adversos, aislamientos naturales de animales de pastoreo y sombrero. Las competitivas (Antagonismo) incluyen, el parasitismo, las alelopatías, el comensalismo y las competencias por espacio como luz, agua, suelo y nutrientes.

La combinación de las distintas actividades, tomando en cuenta su funcionalidad, estructura y situaciones socio-económicas permite clasificar estos sistemas agroforestales. Las distintas actividades agroforestales, ofrecen soluciones a corto, mediano y largo plazo. Con este tipo de esquema de productividad pueden generarse cambios en el uso de los suelos, de manera que en zonas de fuerte pendiente se recupera la cobertura vegetal permanente y se conserva los suelos frente a los fenómenos erosivos, por el arrastre de los suelos.

Las unidades agroforestales permiten responder a situaciones, problemas rurales cotidianos, como la necesidad de la leña, proteínas animales, fuertes vientos, ausencia de sombras para animales y cultivos, insostenibilidad de la agricultura de alta montaña, baja seguridad alimentaria, inadecuada delimitación de las propiedades, escasez de madera, praderas deterioradas, bajo nivel de ingresos y ocupación de la unidad familiar.

Algunos de los sistemas agroforestales implementados en la región tropical son: Asociación de cacao con especies forestales, asociación de cítricos con cacao, asociación de cacao con caoba, pashaco, tornillo, guaba, bolaina, y asociación de frijol con maíz y especies forestales.

Zavala (2015), manifiesta que el cacao, manejado bajo sistemas agroforestales secuestra y almacena carbono en los diferentes órganos de la planta de las especies forestales que sirven como árboles de sombra y en el cultivo de cacao, así como en el suelo mitigando la alta concentración de dióxido de carbono, y como consecuencia reduce el efecto invernadero y el cambio climático, ya que en la actualidad se tuvo problemas con la roya del café y con una baja en el rendimiento del cacao. Asimismo, menciona que la estrategia de mitigación al Cambio Climático reducirá el nivel de daño producido por el incremento de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Para ello se debe seguir trabajando con sistemas agroforestales en los diferentes cultivos principalmente el cacao en condiciones tropicales.

Los SAF pueden contribuir a mantener la cantidad y calidad del agua, el potencial de los SAF para asegurar el suministro de agua (cantidad y calidad) es el servicio ambiental menos estudiado. Los árboles en los SAF influyen en el ciclo del agua al incrementar la interceptación de la lluvia y de nubes (goteo debido a la condensación al chocar las nubes con la

vegetación) y al modificar la transpiración y la retención del agua en el suelo, reduciendo así la escorrentía e incrementando la infiltración. Diversos estudios reportaron que la infiltración en áreas cultivadas con maíz o soya, o bajo pasturas, fue cinco veces menor que bajo franjas ripiarias cultivadas con una variedad de plantas y especies arbóreas, sugiriendo que el último parece tener mayor potencial para prevenir que la escorrentía superficial (conteniendo sustancias contaminantes) llegue a los cursos de agua. Más aún, los árboles en los SAF pueden reciclar los nutrientes en forma conservadora previniendo su pérdida por lixiviación reduciendo así la contaminación de las aguas freáticas por nitratos u otras sustancias dañinas para el ambiente y la salud humana. Como resultado de menor escorrentía y lixiviación, las microcuencas con buena cobertura del suelo (forestal o de SAF) producen agua de alta calidad.

2.10. Servicios ecosistémicos

Costanza (1997), citado por Camacho (2011) refiere que los servicios ecosistémicos establecen una visión integrada de la economía, la ecología, los aspectos socioambientales y el aprovechamiento conjunto de los recursos, presentando una dualidad conceptual. Daily (1970), detalla que el concepto del mismo se origina en el movimiento ambientalista de EE.UU. en la década de 1970, así como de la conceptualización creciente de la naturaleza como sistemas integrados sinérgicamente.

El término “servicios ambientales”, fue definido por el movimiento ambientalista de Estados Unidos en la década de 1960, registrando su primera formalización científica en el documento, titulado “Study of Critical Environmental Problems” del año 1970, siendo reconocido posteriormente por Ehrlich y Ehrlich (1981). Posteriormente, Daily, (1997) lo define como las “condiciones y procesos por los que los ecosistemas naturales y las especies que los constituyen, sostienen la vida humana”. Para Costanza et al. (1997), los servicios ecosistémicos lo definen como “los beneficios que las poblaciones humanas obtienen, directa o indirectamente, de las funciones de los ecosistemas”, lo que propició un importante debate acerca de la mercantilización de la naturaleza (Delgado, 2014).

En nuestro país, las investigaciones relacionadas a los servicios ecosistémicos han estado ligadas a la economía, teniendo como enfoque valorar los servicios ecosistémicos siguiendo diversas metodologías de valoración. En ese contexto, la publicación pionera en relación a esta temática fue “Valoración Económica de la Diversidad Biológica y Servicios ecosistémicos en el Perú” publicada por el la Oficina de Coordinación del INRENA en el año 2001. La publicación presenta 14 estudios realizados por el Proyecto “Conservación y Manejo de la Diversidad Biológica y Ecosistemas Frágiles” (BIOFOR), y representan los primeros trabajos empíricos de valoración realizados en el país. En esta publicación, los editores realizan

una presentación sobre las potencialidades y limitaciones de la valoración económica; además, muestran la variedad de métodos que existen para valorar económicamente un ecosistema (Glave y Pizarro, 2001).

2.10.1. Clasificación de los servicios ecosistémicos

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA) desarrollada durante los años 2001-2005 presenta como principal conclusión que, durante los últimos cincuenta años se han alterado los ecosistemas como respuesta a la creciente demanda de productos de consumo directo (alimentos, agua dulce, energía, etc.), lo que viene provocando detrimentos en la biodiversidad, mejorando la calidad de vida y desarrollo económico de algunos y acentuando el empobrecimiento de otros (MEA, 2005). Esta evaluación clasificó los servicios ecosistémicos, considerando la propuesta de De Groot et al. (2002), en:

- Servicios de abastecimiento, que incluyen los beneficios tangibles o materiales como alimentos, agua y materias primas;
- Servicios culturales, que son beneficios intangibles o inmateriales como el uso recreativo, la relajación, la educación ambiental y el disfrute estético;
- Servicios de regulación, como la regulación del ciclo de nutrientes y del clima y el control de plagas e inundaciones
- Servicios de soporte, que engloban los mecanismos que sostienen los ecosistemas, como la provisión de hábitat y la formación de suelo.

Posteriormente, en el año 2010 se publica la Clasificación Internacional Común de los Bienes y Servicios Ecosistémicos (CICES) con la finalidad de integrar el ambiente y la contabilidad económica en esta temática, diferenciándose de la primera clasificación en la consideración de los servicios de apoyo o soporte como parte de la estructura, procesos y funciones de los ecosistemas (Haines y Potschin, 2010).

2.10.2. Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales

En la actualidad, se conoce ampliamente que los sistemas agroforestales tienen la capacidad de proveer diversos servicios ecosistémicos. A pesar de ello, existe todavía una comprensión limitada de cómo los árboles de sombra pueden afectar la provisión de múltiples servicios ecosistémicos y de los posibles compromisos (trade-offs) o sinergias entre ellos (José, 2009, Cerda et al., 2016). Esa información se considera esencial para el diseño de sistemas agroforestales óptimos que puedan cumplir con los servicios de más interés para los productores (Rapidel et al., 2015). En ese contexto, de acuerdo a Beer et al. (2003), las principales funciones de los servicios ambientales que proporcionan los sistemas agroforestales son:

- La captación de carbono.
- Mantenimiento de la fertilidad del suelo y conservación de la erosión, a través de los aportes de materia orgánica para la fijación de nitrógeno y el reciclaje de nutrientes.
- La conservación del agua (en cantidad y calidad) a través de una mayor infiltración y reducción de la escorrentía superficial, que podría contaminar las fuentes de agua.
- Conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados.

Estas funciones de servicios complementan los productos que los SAF proveen (para uso comercial y doméstico, por ejemplo, leña, madera, frutas), pero los agricultores rara vez son recompensados por ellos.

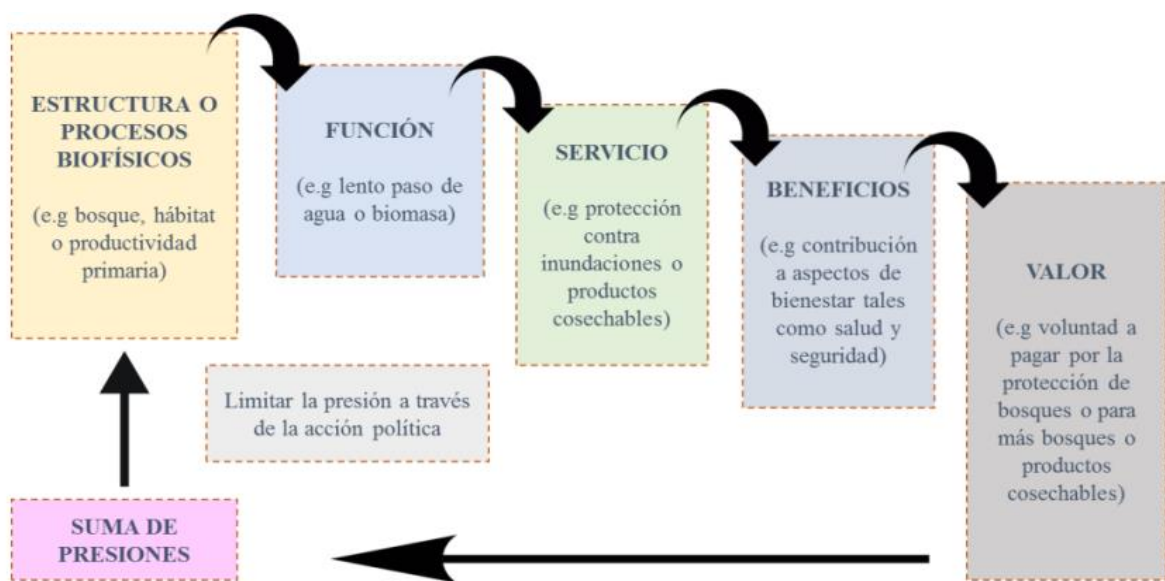


Figura 3. Modelo de cascada para los servicios ecosistémicos de acuerdo a la CICES.

Extraído de Haines y Potschin (2010) modificado por De Groot et al. (2009)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se realizó en una parcela de *C. arábica* “Café caturra” ubicada en la Divisoria, en el caserío de Río Azul, distrito de Hermilio valdizan, provincia de Leoncio prado en la región Huánuco, ubicado en las siguientes coordenadas de referencia del área donde se realizó el estudio:



Puntos	:	1	2	3	4
Este (m)	:	410282	410389	410560	410780
Norte (m)	:	8983867	8984278	8984567	8986578
Altitud (m.s.n.m.)	:	1394	1391	1390	1395.

El área seleccionada para el estudio se llevó a cabo en una parcela con una extensión de 9 000 m² de café de la variedad Caturra de 12 años de edad ubicada en la localidad de Río Azul, el cual se ubica en una montaña alta con pendientes mayores de 30 % bajo un sistema agroforestal. La plantación de café tiene un distanciamiento de 2,0 m x 1,50 m y las especies con la que está asociado actúan como sombra, generando microclimas favorables.

3.1.1. Características climáticas

La zona de estudio de la parcela presenta un clima semi cálido y húmedo con abundantes precipitaciones la mayor parte del año; con una temperatura media anual de 21,5 °C, con una máxima de 29 °C y una mínima de 15,5 °C. Pertenece a la región natural Selva alta con una zona de vida de bosque muy húmedo sub tropical (bmh-ST), y con precipitación de 4 183,2 mm, una humedad relativa mensual promedio de 90 %. La temperatura promedio oscila entre 21 a 22 grados centígrados, asimismo, existe una variación con respecto a la

precipitación siendo la época lluviosa entre octubre y abril, mientras que la época seca comienza en mayo y termina en septiembre.

3.1.2. Características del suelo

Desde el punto de vista geológico, las parcelas presentan rocas sedimentarias calcáreas y metamórficas, así como areniscas, y arcillitas, Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, de textura media a moderadamente fina, de color amarillo parduzco a pardo amarillento claro con moteados rojos, de drenaje bueno a moderado, de reacción ácida muy fuerte, baja saturación de bases, bajo y contenido de materia orgánica, suelos que pertenecen al orden Inceptisols.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Entre los equipos utilizados en el presente estudio se tiene: Receptor GPS, cámara fotográfica, equipo de cómputo, calculadora científica, balanza analítica, estufa, matraces entre otro equipamiento de laboratorio que permitió medir la cantidad de carbono en los diferentes componentes en estudio. Respecto a los materiales y herramientas empleados e tiene lo siguiente: wincha de 100m y 3m, tijeras de podar, palas rectas, picos, machetes, cilindros Uhlands de 85 cc, papel periódico, bolsas de plásticos de diferentes tamaños, costales de polietileno de 50 Kg, marco de madera o tubo de 1m x 1m, marco de madera o tubo de 0,5m x 0,5m, lapiceros, lápices, plumones indeleble, tablero de campo, libreta de campo, cinta métrica, martillo de madera, martillo de Geólogo, entre otros materiales y herramientas que sirvió para el correcto muestreo e identificación.

3.2.2. Metodología

La metodología desarrollada para la determinación de carbono en sistemas agroforestales se basó en la propuesta del Centro Mundial Agroforestal indicado por ICRAF y la mención de Rüginitz et al., (2009); para la evaluación de la biomasa vegetal se utilizó el método recomendado por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería indicado por Arévalo et al., (2002). Para esto, se tuvo en consideración las diferentes etapas del estudio (campo, campo, laboratorio y gabinete), el establecimiento de parcelas de muestreo en las unidades en estudio; identificándose las siguientes variables, el diseño estadístico y los siguientes procedimientos:

3.2.2.1. Tipo de investigación

El presente es una investigación descriptiva no experimental, debido a que se evalúa la variable sin manipulación deliberada de los factores que la componen,

analizándose posteriormente utilizando criterios técnicos – científico, utilizando el método alométrico con estimaciones de fórmulas alométricas. Por otro lado, es una investigación prospectiva ya que los datos requeridos para el estudio se recopilan para el propósito del estudio.

3.2.2.2. Variables en estudio

La toma de muestras de hojarasca, raíces y suelo de diferentes unidades fisiográficas como unidades experimentales arroja las siguientes variables

a. Variable independiente

- Sistema agroforestal (café caturra 12 años – especies arbóreas 20 años)

b. Variable dependiente

- Biomasa y carbono en plantas de café
- Biomasa y carbono en árboles de sombra
- Biomasa y carbono en herbácea-arbustos
- Biomasa y carbono de las raíces
- Biomasa y carbono seca (hojarasca)
- Carbono orgánico del suelo por profundidad
- Densidad aparente por profundidad o estratos
- Servicios ambientales o ecosistémicos

3.2.2.3. Diseño experimental

El estudio fue realizado considerando un diseño no experimental, siendo un estudio premeditado configurado teniendo en consideración la percepción y descripción del contenido natural de carbono en asociaciones agroforestales (café – especies arbóreas).

3.2.2.4. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados aplicando estadística descriptiva en un inicio para evaluar el nivel de carbono en un sistema agroforestal con café. Para esto se definieron ocho transectos, así, previo a la comparación de muestras independientes en las dimensiones establecidas; se procedió a realizar la prueba de normalidad en los datos registrados y verificar la hipótesis, para esto se empleó la prueba de Shapiro-Wilk a un nivel de significancia del 0,05 (significancia teórica establecida por la investigadora). Una vez cumplido los supuestos se aplicaron la prueba de T de Student para una muestra tomando como valor de referencia los registros de Gonzales (2018), para las variables en estudio.

3.2.2.5. Selección y delimitación del área en estudio

La parcela en estudio se ubicó en un SAF's de árboles forestales de sombra con café, manejados bajo el sistema agroforestal, con 12 años de edad, las cuales correspondieron a un paisaje de montaña, con unidades fisiográficas de montañas bajas a altas, en un promedio de 1 hectárea, donde se procedió la delimitación formando 8 transectos dentro de cada parcela (A, B, C, D, E, F, G y H) tal como se detalla a continuación:

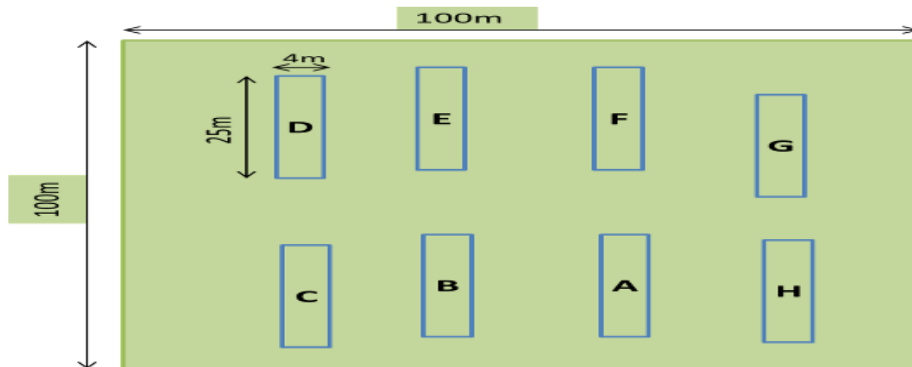


Figura 4. Detalle de parcela con los ocho transectos internos

3.2.2.6. Evaluación del carbono de la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal

La metodología utilizada para la evaluación de biomasa vegetal fue la recomendada por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (Arévalo et al., 2002).

a. Biomasa viva

Para evaluar la biomasa arbórea viva se trazaron parcelas de 4 m x 25 m, realizándose el inventario de todos los individuos dentro de la misma; para el caso de *Coffea arabica* (Café), el diámetro del tallo será tomado a 30 cm desde el suelo (Alegre et al., 2002), mientras que para el componente forestal se evaluó el diámetro (DAP) a 1,30 cm del suelo de todos los árboles forestales.

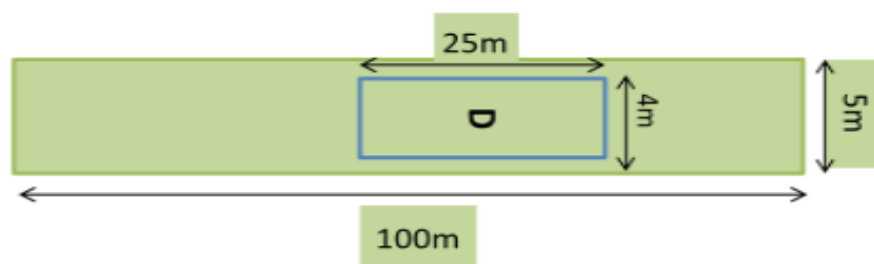


Figura 5. Detalle de parcela para la medición del carbono en las especies arbóreas y cafetos

La biomasa arbustiva (BAb) y herbácea (Hbh), estuvo compuesta por la biomasa sobre el suelo (epigea) de arbustos menores de 2,5 cm de diámetro, gramíneas

y otras hierbas. La recolección de muestras de material arbustivo y herbáceo se efectuó por muestreo directo con dos cuadrantes de 1 m x 1 m, distribuidos al azar dentro de los transectos de 4 m x 25 m (Figura 5). Se cortó toda la vegetación al nivel del suelo, se pesó el total de la muestra y luego se extrajo una submuestra en bolsas de papel periódico y se colocó en una estufa de aire caliente a 75°C durante 72 horas hasta obtener peso seco constante.

Asimismo, empleando un monolito de 40 x 40 x 40 cm, establecida para el muestreo del suelo, dentro de los cuadrantes descritos líneas arriba, se extrajeron las raíces, de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, y 20 a 30 cm, para ser depositadas en bolsas plásticas codificadas, trasladadas al laboratorio, para los análisis de materia orgánica, asimismo las raíces después de su lavado y tamizado fueron pesados en una balanza digital y envueltos en papel periódico que a su vez se secaron en una estufa a 75°C hasta obtener peso constante.

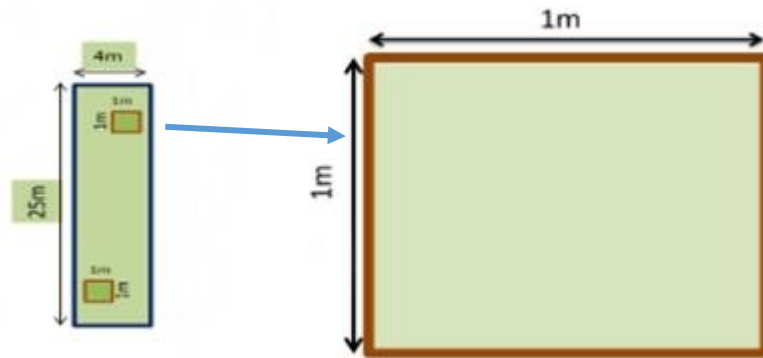


Figura 6. Detalle de cuadrantes de 1 m x 1 m para medición del carbono en material herbáceo, arbustivo y raíces

b. Biomasa seca (hojarasca)

Se cuantificó la capa de mantillo u hojarasca y otros materiales muertos (ramillas, ramas), utilizando cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m colocados dentro de cada uno de los cuadrantes de 1 m x 1 m. (Figura 6). Se colocó toda la hojarasca en bolsas, registrando su peso fresco total en una superficie de 0,25 m². De esta muestra se extrajo una submuestra y se registró su peso y se procedió a su secado en la estufa a temperatura constante de aire caliente a 75°C hasta obtener peso seco constante.

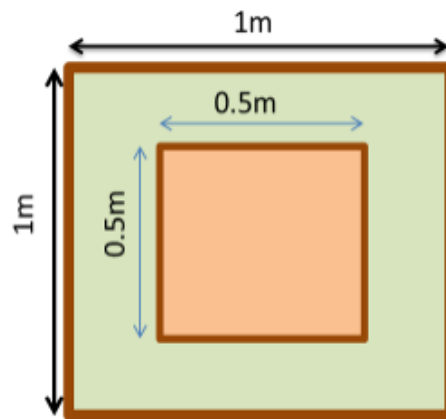


Figura 7. Detalle de cuadrantes interiores de 0,5m x 0,5m para la medición del carbono en la hojarasca

3.2.2.7. Evaluación del carbono del suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

Para la evaluación del carbono total del suelo, se abrió monolitos en cada uno de los cuadrantes delimitados, para el muestreo de la biomasa herbácea y arbustiva, con dimensiones de (0,50 x 0,50 x 0,50m) de las cuales se extrajeron muestras de suelo en forma estratificada (0-10; 10-20 y 20-30 cm de profundidad), en cada estrato se colocaron cilindros Uhlund de volumen conocido y se llevaron a estufa a 105°C por 24 horas para estimar la densidad aparente del suelo (Alegre et al., 2002). Asimismo, se extrajeron muestras de 500g en promedio de suelo que se codificaron debidamente y se trasladaron al laboratorio para la determinación de materia orgánica por el método de Walkley Black (modificado).

3.2.2.8. Cálculos para determinar el carbono en el cultivo de café como sistema agroforestal

Las fórmulas empleadas para la determinación del carbono aéreo y del suelo fueron las establecidas por el ICRAF según Arévalo et al., (2002).

a. Cálculos de la biomasa vegetal total

✚ Biomasa arbórea viva (t. ha⁻¹)

En primera instancia se determinó la biomasa de las especies forestales identificadas en el transecto de 4 m x 25 m a partir de las medidas del diámetro a la altura del pecho (DAP). La fórmula se muestra a continuación:

$$B_A = 0.1184 \times DAP^{2.53}$$

Donde:

B_A : Biomasa de árbol individual (kg.árbol⁻¹)

- 0.1184 : Constante
 2.53 : Constante
 DAP : Diámetro (cm) a la altura del pecho (1,30 m desde el suelo)

Luego se determinó la biomasa de los individuos de café identificados en el transecto de 4 m x 25 m a partir de las medidas del diámetro del tallo a 30 cm del suelo y la altura total de la planta. La fórmula empleada es la siguiente (Suárez, 2002):

$$\mathbf{Ln (B_C) = -2.39 + 0.95 \times Ln (D) + 1.27 \times Ln (H)}$$

Donde:

- B_C : Biomasa de cafetos (kg. árbol⁻¹)
 Ln : Logaritmo natural
 D : Diámetro del tallo de cafeto a 30 cm del suelo (cm)
 H : Altura total del cafeto (m)
 -2.39 : Constante
 0.95 : Constante
 1.27 : Constante

Finalmente, para calcular la biomasa de especies arbóreas vivas por hectárea (especies forestales y cafetos), se sumaron el valor de todos los individuos medidos y registrados en cada parcela y posteriormente se multiplica por el factor de conversión tal como se muestra a continuación.

$$\mathbf{B_{TFC} = B_{TP} \times 0.1}$$

Donde:

- B_{TFC} : Biomasa total de árboles forestales y cafetos (t. ha⁻¹)
 B_{TP} : Biomasa total de la parcela (kg) = $\sum B_A + \sum B_C$
 0.1 : Factor de conversión de la parcela 4 x 25 m

Biomasa arbustiva y herbácea (t. ha⁻¹)

$$\mathbf{B_{AB-HB} = ((P_{SM} / P_{FM}) \times P_{FT}) \times 0.01}$$

Donde:

- B_{AB-HB} : Biomasa arbustiva-herbácea (t.ha⁻¹)
 P_{SM} : Peso seco de la muestra arbustiva-herbácea (g)
 P_{FM} : Peso fresco de la muestra arbustiva-herbácea (g)
 P_{FT} : Peso fresco total de arbusto-hierbas por m² (g)
 0.01 : Factor de conversión

✚ Biomasa de la hojarasca (t.ha⁻¹)

$$B_H = ((P_{SH} / P_{FH}) \times P_{FTH}) \times 0.04$$

Donde:

- B_H : Biomasa de la hojarasca (t.ha⁻¹)
 P_{SH} : Peso seco de la muestra de hojarasca (g)
 P_{FH} : Peso fresco de la muestra de hojarasca (g)
 P_{FTH} : Peso fresco total de hojarasca por m² (g)
 0.04 : Factor de conversión

✚ Biomasa de las raíces (t.ha⁻¹)

$$B_R = ((10000 \times P_{SR}) / 0.25) / 1000$$

Donde:

- B_R : Biomasa de las raíces (t.ha⁻¹)
 P_{SR} : Peso seco de las raíces (kg)
 0.25 : Constante para parcelas de 0.5 m x 0.5 m
 10000 : Constante
 1000 : Constante

✚ Cálculo de la biomasa vegetal total (t.ha⁻¹)

$$B_{VT} = B_{TFC} + B_{AB-HB} + B_H + B_R$$

Donde:

- B_{VT} : Biomasa vegetal total (t.ha⁻¹)
 B_{TFC} : Biomasa total de árboles forestales y cafetos (t.ha⁻¹)
 B_{AB-HB} : Biomasa arbustiva – herbácea (t.ha⁻¹)
 B_H : Biomasa de la hojarasca (t. ha⁻¹)
 B_R : Biomasa de las raíces (t. ha⁻¹)

✚ Cálculo del carbono en la biomasa vegetal total (t. ha⁻¹)

La biomasa vegetal total se multiplicó por el factor 0,45; que corresponde al carbono existente.

$$C_{BV} = B_{VT} \times 0.45$$

Donde:

- C_{BV} : Carbono en la biomasa vegetal total (t. ha⁻¹)
 B_{VT} : Biomasa vegetal total (t. ha⁻¹)
 0.45 : Constante (Brown, 1997)

b. Cálculos de la densidad, volumen y carbono del suelo

Se calculó el peso del volumen del suelo por hectárea, evaluando primero la densidad aparente del suelo por cada uno de los horizontes.

✚ Densidad aparente del suelo (g.cc^{-1})

$$D_A = P_{SS} / V_{CH}$$

Donde:

- D_A : Densidad aparente (g.cc^{-1})
 P_{SS} : Peso seco del suelo dentro del cilindro (g)
 V_{CH} : Volumen cilindro (constante)

✚ Peso del volumen de suelo por estrato de muestreo

$$P_{VS} = D_A \times P_S \times 10000$$

Donde:

- P_{VS} : Peso del volumen de suelo (t. ha^{-1})
 D_A : Densidad aparente (g.cc^{-1})
 P_S : Espesor o profundidad del horizonte del suelo (m)
 10000 : Constante

✚ Cálculo del carbono en el suelo (t. ha^{-1})

El cálculo del carbono en el suelo se realizó a partir del nivel de materia orgánica registrado, se utilizó la siguiente fórmula empleada por Zavala et al., (2018).

$$C_S = (MO * 100) / 1.724$$

Donde:

- C_S : Carbono en el suelo (t. ha^{-1})
 MO : Porcentaje de materia orgánica analizada en laboratorio
 1.724 : Coeficiente de Van Vanmelen

c. Cálculos del carbono total (biomasa vegetal más suelo)

✚ Cálculo del carbono total del SAF (t ha^{-1})

$$C_T = C_{BV} + C_S$$

Donde:

- C_T : Carbono total del SAF (t ha^{-1})
 C_{BV} : Carbono en la biomasa vegetal (t. ha^{-1})
 C_S : Carbono en el suelo (t. ha^{-1})

3.2.2.9. Determinación de los servicios ecosistémicos

Para identificar los servicios ecosistémicos dentro del cultivo de café como sistema agroforestal se determinaron los factores ambientales dentro y fuera de los transectos; a través de la medición de la temperatura, la humedad relativa dentro y fuera de la parcela, así mismo la luminosidad o radiación, se determinó la materia orgánica de 0 a 10 cm de profundidad con el contenido de materia orgánica, y el color de suelos.

A. Metodología:

- La medición de la T^a se realizó con el Hidrómetro digital, que tiene la T^a promedio máximo y mínimo, midiendo en 5 puntos diferentes dentro y fuera (en pleno sol y con sombra) del transecto; la evaluación se realizó por cada semana, así mismo por transecto desde el A hasta la H. La primera semana se realizó el transecto A, en la semana siguiente el transecto B, así sucesivamente, y se trabajó con los datos promedios de toda la evaluación, evaluando 5 veces en un solo horario.

- La medición de la HR^a se hizo con el Hidrómetro digital, que tiene la HR^a promedio máximo y mínimo, midiendo en 5 puntos diferentes dentro y fuera (en pleno sol y con sombra) del transecto; la evaluación se realizó por cada semana 1 transecto. La primera semana se realizó el transecto A, en la semana siguiente el transecto B, así sucesivamente, y se trabajó con los datos promedios de toda la evaluación, evaluando 5 veces en un solo horario.

- La medición de la luminosidad se realizó con el Luxímetro digital, se midió en 5 puntos diferentes dentro y fuera (en pleno sol y con sombra) del transecto; la evaluación se realizó por cada semana 1 transecto. La primera semana se realizó el transecto A, en la semana siguiente el transecto B, así sucesivamente, y se trabajó con los datos promedios de toda la evaluación, evaluando 5 veces en un solo horario.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Carbono almacenado en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal

A continuación, se muestran los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk al 0,05 de significancia para comprobar la normalidad de los datos de carbono almacenado en la biomasa vegetal del SAF (Tabla 1). A partir de esto se tiene que, todas las variables tienen una distribución normal por cuanto los valores de significancia son superiores al 0,05 a excepción del contenido de carbono en la hojarasca del SAF.

Tabla 1. Prueba de Shapiro-Wilk para el carbono almacenado ($t \cdot ha^{-1}$) en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal

Variable	Shapiro-Wilk	
	G1	Sig.
Carbono en las especies forestales (t/ha)	8	NS
Carbono en los cafetos (t/ha)	8	NS
Carbono en las herbáceas y arbustos (t/ha)	8	NS
Carbono en la hojarasca (t/ha)	8	*
Carbono en las raíces (t/ha)	8	NS

NS: No significativo al 5 %

* Diferencia significativa al 5 %

** Alta diferencia significativa al 5 %

Para la prueba t de Student de los valores de carbono en la biomasa vegetal del cultivo de café como SAF para una muestra y utilizando como valores de prueba los obtenidos por Gonzales (2018) en la zona de José María Ugarteche en una SAF de café de 07 años (15,43 t/ha para el componente arbóreo; 5,32 t/ha para los cafetos; 1,68 t/ha para las herbáceas-arbustos; 11,85 t/ha para la hojarasca y de 1,77 t/ha para las raíces); así, considerando los resultados obtenidos se puede inferir que todos los valores evaluados no tienen semejanza estadística con los valores de prueba (Tabla 2).

Tabla 2. Prueba t de Student ($\alpha=0,05$) para el carbono almacenado ($t\cdot ha^{-1}$) en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal.

Variable	gl	Valor-t	Sig.
Carbono en las especies forestales (t/ha)	7	6,00	**
Carbono en los cafetos (t/ha)	7	-140,41	**
Carbono en las herbáceas y arbustos (t/ha)	7	-8,37	**
Carbono en la hojarasca (t/ha)	7	-29,12	**
Carbono en las raíces (t/ha)	7	-24,32	**

NS: No significativo al 5%

* Diferencia significativa al 5%

** Alta diferencia significativa al 5%

Por otro lado, se muestran los principales estadísticos del carbono en la biomasa vegetal obtenidos a partir de las evaluaciones. Cabe mencionar que, para el caso de las especies forestales y las herbáceas-arbustos el coeficiente de variación supera el 30% lo que permite inferir que los datos tienen algo grado de heterogeneidad lo cual podría deberse principalmente a los procedimientos realizados en laboratorio y a las implicancias de la recolección de datos en campo debido a errores de lectura y calibración de equipos (Tabla 3).

Tabla 3. Valores máximos, mínimos y media del contenido de carbono en la biomasa vegetal del cultivo de café como sistema agroforestal

Variable	N	Media	Error	Desviación estándar	CV (%)
Carbono en las especies forestales (t/ha)	8	47,98	5,42	15,34	31,97
Carbono en los cafetos (t/ha)	8	1,09	0,03	0,085	7,80
Carbono en las herbáceas y arbustos (t/ha)	8	0,81	0,10	0,30	37,04
Carbono en la hojarasca (t/ha)	8	5,66	0,21	0,60	10,60
Carbono en las raíces (t/ha)	8	0,92	0,03	0,10	10,64

Fuente: Elaboración propia

El valor del carbono almacenado en las especies forestales alcanza un máximo valor de 76,83 t/ha y un mínimo de 21,18 t/ha con un valor medio de 47,98 t/ha (Figura 7); valores que difieren estadísticamente y superan el reporte de Gonzales (2018), quien para una zona similar obtuvo 15,43 t/ha para el componente arbóreo de *Inga spp.* en una parcela a 1 400 msnm; de la misma manera los valores obtenidos superan los reportes de Zavala et al. (2018) quienes refieren 25,17 t/ha; a esto es importante mencionar los reportes de Clemente (2022),

quien detalla un valor similar en la biomasa aérea (78,1 Mg C/ha) en una asociación de cedro-copazú-plátano. A esto es importante mencionar que la masa arbórea de la presente investigación está representada por *Juglans spp.* “Nogal”, *Inga spp.* “Guaba” y *Vernonanthura spp.* “Ocuera negra”, sin embargo, también se verifica cierta diferencia con los valores obtenidos por Andrade et al. (2014), quien en un SAF de nogal registra 36,7 Mg/ha. En ese sentido, estas diferencias se justifican dada las especies así como el tiempo de madurez; a esto se concuerda con Alegre et al. (2002) quienes refieren que, de acuerdo a la edad de las especies forestales se incrementa la edad, teniendo mayor vigorosidad y por tanto se produce mayor acumulación de biomasa y con esto mayor acumulación de carbono; a su vez, la variabilidad de los resultados pueden deberse a diversos factores exógenos; dado que se verifica que existe variabilidad en el contenido de carbono entre especies y entre diferentes fracciones de biomasa dentro de una misma especie (Gayoso y Guerra, 2005). Finalmente, cabe mencionar la mención de Espinoza et al. (2012), que para las variaciones marcadas de C en el componente arbóreo se debe principalmente a la heterogeneidad de las plantaciones, las cuales se relacionan con la densidad de plantación, el manejo técnico-agrícola y la edad de la plantación.

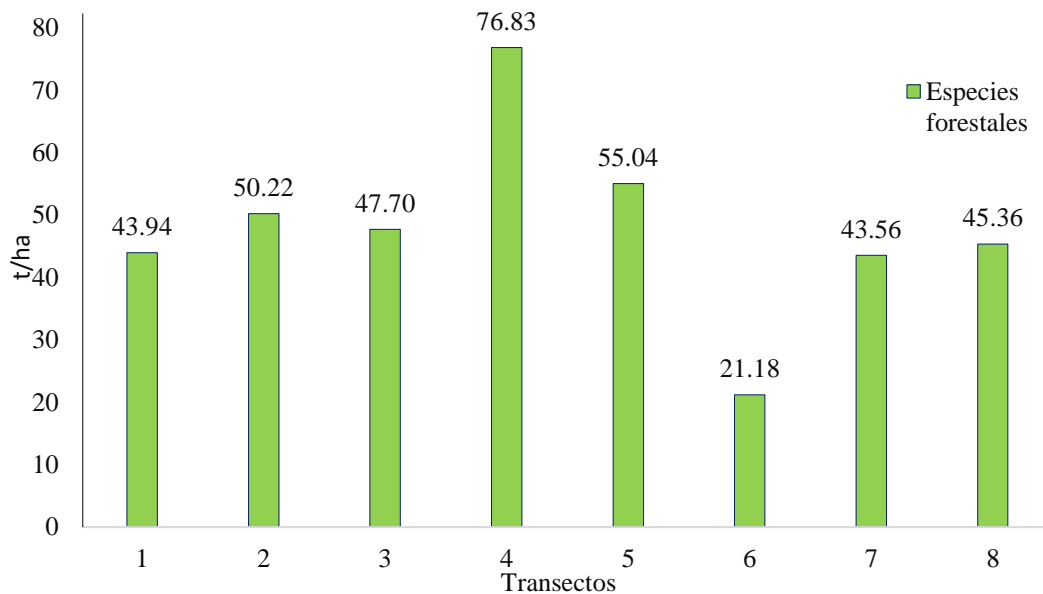


Figura 8. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en la biomasa vegetal de especies forestales en el cultivo de café como sistema agroforestal

Para el caso del carbono en las plantas de café, se tiene un valor medio de 1,09 t/ha y un intervalo de valores entre 0,96 – 1,09 t/ha (Figura 8); valores inferiores a los obtenidos por Gonzales (2018), quien en cafetos de la variedad caturra de 07 años registró 5,32 t/ha; por otro lado, se coincide con el mismo autor para cafetos de 04 años donde obtuvo en promedio de 0,81 t/ha; por Zavala et al. (2018), quienes obtuvieron valores de 8,42 t/ha quienes registran

valores superiores a los de las presente. La variación que se presenta podría justificarse a diversos factores, a esto Espinoza et al. (2018), mencionan que en el café los patrones de crecimiento dependen de la variedad utilizada; asimismo, es frecuente encontrar de tres a nueve ramificaciones, abajo del diámetro a la altura del pecho, aspecto que influye en los valores que generan los modelos de estimación de biomasa; asimismo, el comportamiento de la regeneración puede afectar también las reservas (Rajagopal, 2004); a partir de esto, se justifica los resultados obtenidos dado que la parcela en estudio posee la variedad Catimor a una densidad de siembra de 2 m x 1,5 m.

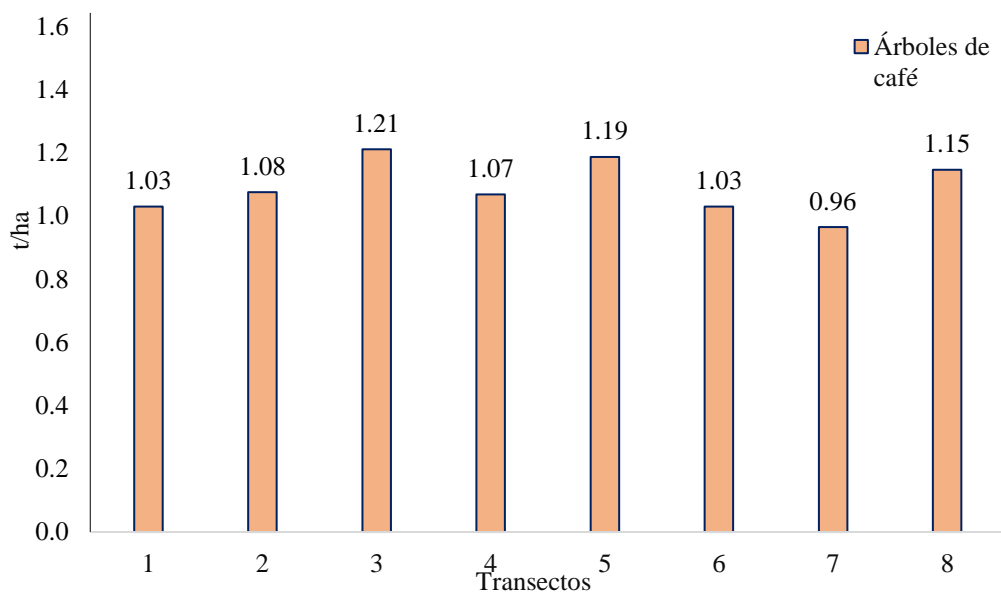


Figura 9. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en los cafetos en el cultivo de café como sistema agroforestal

En relación a las herbáceas y arbustos se tiene una fijación promedio de 0,81 t/ha y valores entre 0,40 – 1,22 t/ha (Figura 9), estos valores son inferiores a los registros de Gonzales (2018) y Zavaleta et al. (2018), quienes en un SAF de café de la variedad Caturra registraron 1,68 t/ha y 0,95 t/ha respectivamente; a esto es importante mencionar que la presente investigación refiere que este componente del SAF está representado principalmente por los pastos dentro de la parcela; por esto, las diferencias podrían justificarse dado el alto nivel de densidad del follaje de las especies forestales y la escasez de abiertos y dado que el tipo de bosque no proporciona las condiciones de temperatura, humedad y luz que impulsen el crecimiento de semillas latentes en el suelo; cabe mencionar que los resultados obtenidos coinciden ligeramente con la investigación de Espinoza et al. (2012), quienes estimaron un valor de 0,6 Mg C/ha en un bosque caducifolio; asimismo, los autores ratifican nuestra premisa

dado que refieren que el componente arbóreo impide el crecimiento de hierbas y a la cantidad de hojarasca producida por el mismo.

Respecto a la hojarasca en el SAF en estudio se refiere un promedio de 5,66 t/ha de carbono el cual se configura en el intervalo de 5,15 – 6,58 t/ha (Figura 10), valores superiores a los registrados por Espinoza et al. (2012), quienes obtuvieron un máximo valor de 1,9 Mg C/ha en un bosque caducifolio y un SAF de café-chalahuite y de Zavala et al. (2018), quienes detalla 1,90 t/ha; en contraste, los registros obtenidos son inferiores a los de Gonzales (2018) quien estimó un valor de 11,85 t/ha para la hojarasca; estas diferencias pueden deberse al nivel de limpieza que recibe el sistema, dado que esta labor afecta directamente en la formación del mantillo, existiendo un bajo nivel de incorporación al suelo en un sistema intenso de manejo, esto coincidiendo con Alpizar et al. (1983), quienes afirman que las diferencias en la cantidad de hojarasca se deben al tipo de café y sombra, edad de la plantación, manejo del cultivo (frecuencia e intensidad de poda de árboles de sombra y cultivo, frecuencia en el control de malezas) tipo de maleza, densidad del cultivo y de los árboles de sombra y época del muestreo.

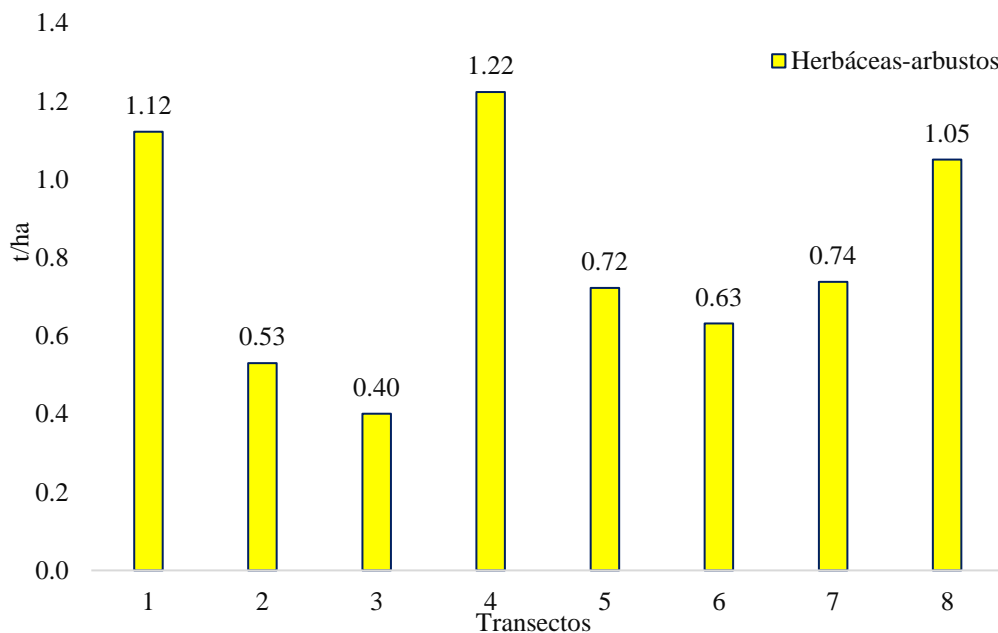


Figura 10. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en las herbáceas-arbustos en el cultivo de café como sistema agroforestal

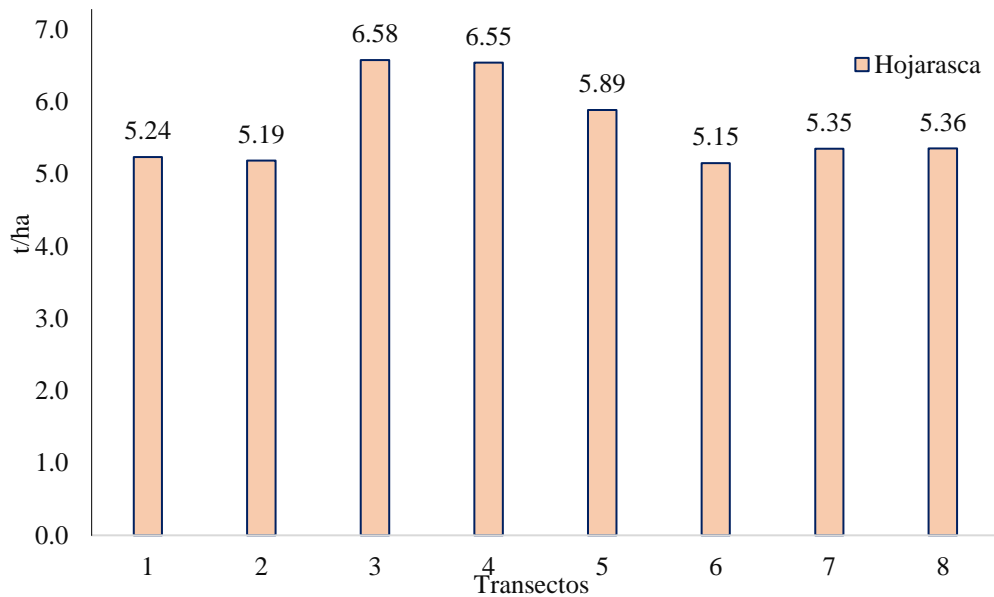


Figura 11. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en la hojarasca en el cultivo de café como sistema agroforestal

Respecto a las raíces, se alcanza un registro promedio de almacenamiento de 0,92 t/ha en un intervalo de 0,79 - 1,06 t/ha (Figura 11), valor inferior al obtenido por Gonzales (2018) quien registra 1,77 t/ha; a esto es importante mencionar que el valor obtenido en la presente investigación está referido principalmente a las raíces finas, considerándose que el C de las raíces estructurales de las especies forestales y de los cafetos están incluidas en su propio análisis; ante esto Fisher et al. (1994), afirman que las especies con sistema radicular profundo constituyen una opción para incrementar en buena medida la acumulación, ya que lo pueden redistribuir en las capas más profundas de suelo. Por otro lado, Beltrán y Erazo (2017), refieren que los cultivos agrícolas poseen características estadísticamente similares que los SAF en referencia a la captura de carbono en raíces finas presentando diferencias significativas para las profundidades de 10-20 y 20-30 cm con un almacenamiento de 0,28 t/ha, a su vez los autores detallan que la biomasa de raíces finas tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad. Cabe mencionar que las diferencias registradas en las raíces finas, dada la tendencia y distribución de las mismas pueden deberse a diversos factores como la profundidad del suelo, cobertura y composición florística del área, así como de la variedad y especie, edad de las plantas, prácticas de manejo que se realizan, densidad de siembra, cambios en la compactación del suelo, textura y contenido de humedad, los cuales afectan directamente la capacidad de absorción de humedad a lo largo del perfil (Zanabria y Cuellar, 2015). La compactación del suelo es un factor que genera variaciones en la disponibilidad hídrica, movimiento del aire y resistencia a la penetración (Agüero y Alvarado, 1983; Jiménez y Arias, 2004).

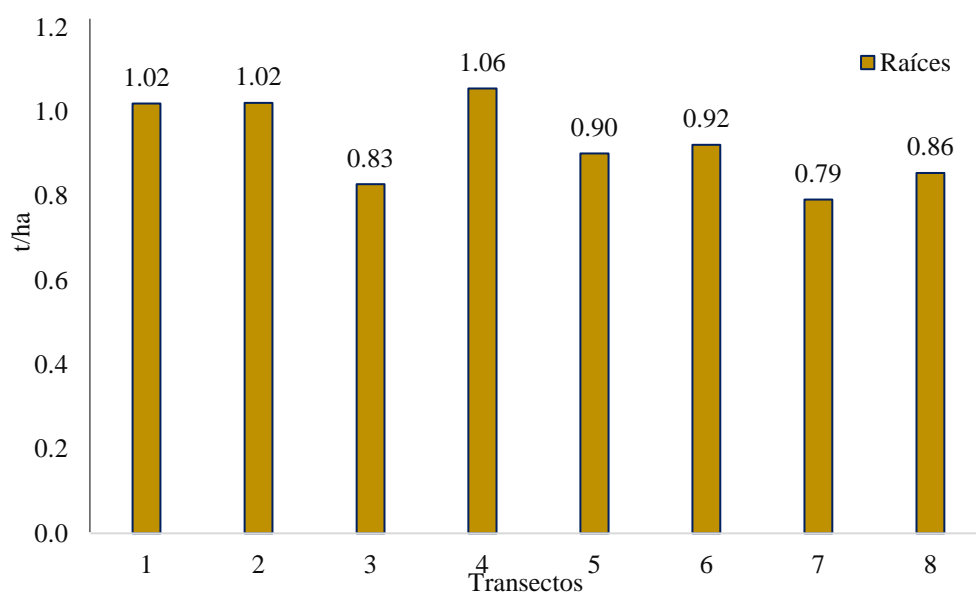


Figura 12. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en las raíces en el cultivo de café como sistema agroforestal

4.2. Carbono almacenado en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

A continuación, se detalla los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para verificar si los datos obtenidos para el sistema del suelo en el SAF se distribuyen con normalidad (Tabla 4); estos registros permiten inferir que las variables identificadas se distribuyen con normalidad.

Tabla 4. Prueba de Shapiro-Wilk para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

Variable	Shapiro-Wilk	
	GI	Sig.
Carbono en el suelo (t/ha)	8	NS
Densidad aparente del suelo (g/cc)	8	NS
Peso del volumen del suelo (t/ha)	8	NS

NS: No significativo al 5 %

* Diferencia significativa al 5 %

** Alta diferencia significativa al 5 %

Los resultados para la prueba t de Student de los valores de carbono en el suelo del cultivo de café como SAF para una muestra y utilizando como valores de prueba los obtenidos por Gonzales (2018) en la zona de José María Ugarteche en una SAF de café de 07 años (82,53 t/ha para el contenido de carbono en el suelo; 1 382,28 t/ha para el peso del volumen

y de 1,38 g/cc para la densidad aparente) permiten concluir que los datos no se asemejan estadísticamente a los valores de prueba considerados (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba t de Student ($\alpha=0,05$) para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

Variable	Gl	Valor-t	Sig.
Carbono en el suelo (t/ha)	7	3,758	**
Densidad aparente del suelo (g/cc)	7	-5,64	**
Peso del volumen del suelo (t/ha)	7	-5,691	**

NS: No significativo al 5 %

* Diferencia significativa al 5 %

** Alta diferencia significativa al 5 %

A continuación, se muestran los principales estadísticos del suelo dentro del cultivo de café como sistema agroforestal. Respecto a la homogeneidad de los datos recolectados se tiene que en ninguno de las variables el coeficiente de variación supera el 14 % por lo que se puede inferir que la dispersión de los datos muestra valores homogéneos respecto a su media aritmética (Tabla 6).

Tabla 6. Valores máximos, mínimos y media para las variables en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

Variable	N	Media	Error	Desviación estándar	CV (%)
Carbono en el suelo (t/ha)	8	100,61	4,812	13,610	13,53
Densidad aparente del suelo (g/cc)	8	1,117	0,047	0,132	11,82
Peso del volumen del suelo (t/ha)	8	1 116,44	46,711	132,118	11,83

Fuente: Elaboración propia

Respecto al carbono contenido en el suelo, se tiene como valor promedio 100,61 t/ha dentro de un intervalo de 79,76 – 120,17 t/ha (Figura 12); el análisis de acuerdo a la profundidad permite inferir que los valores de C disminuyen a medida que aumenta la profundidad coincidiendo con Muños (2006). La comparación del valor medio del carbono en el suelo supera a los valores obtenidos por Gonzales (2018) quien en una zona similar al del presente estudio obtuvo un valor promedio de 82,53 t/ha, a los registros de Espinoza et al. (2012), quienes registraron hasta 73 Mg C/ha en un SAF de café-plátano, con Jara (2016) quien en la zona de Hermilio Valdizán, Huánuco, obtuvo un valor de 52,531 t/ha; sin embargo, son inferiores a los registro de Zavala et al. (2018), quienes detallan 148,24 t/ha, así como con el

reporte de Robert (2002) quien refiere valores de 123 t/ha. Estas marcadas diferencias podrían justificarse con diversos factores, Robert (2001) aclara que la existencia de C en el suelo se relaciona principalmente con la formación suelo a largo plazo representando un balance dinámico entre la absorción de material muerto y la mineralización; asimismo, los valores superiores de la presente investigación pueden ser influenciados dada la acumulación de material orgánico producto del cambio de uso de suelo de bosque natural a plantación asociada; por otro lado, Zavala et al. (2018), refieren que estos cambios se ven influenciados por la densidad de siembra, la clase textural y el nivel de prácticas culturales que se realizan: podas, prácticas de conservación edáfica y la cantidad de residuos de las cosechas.

La densidad aparente del suelo tuvo como valor medio 1,116 g/cc y un valor mínimo de 0,902 g/cc y de 1,263 g/cc como máximo valor (Figura 13); cabe mencionar que la comparación de estos valores con diferentes antecedentes puede diferir de acuerdo a la diversidad edáfica de las zonas en estudio; así, Espinoza et al. (2012), detallan un valor de 0,90-1,12 en cultivos de café en sistemas agroforestales.

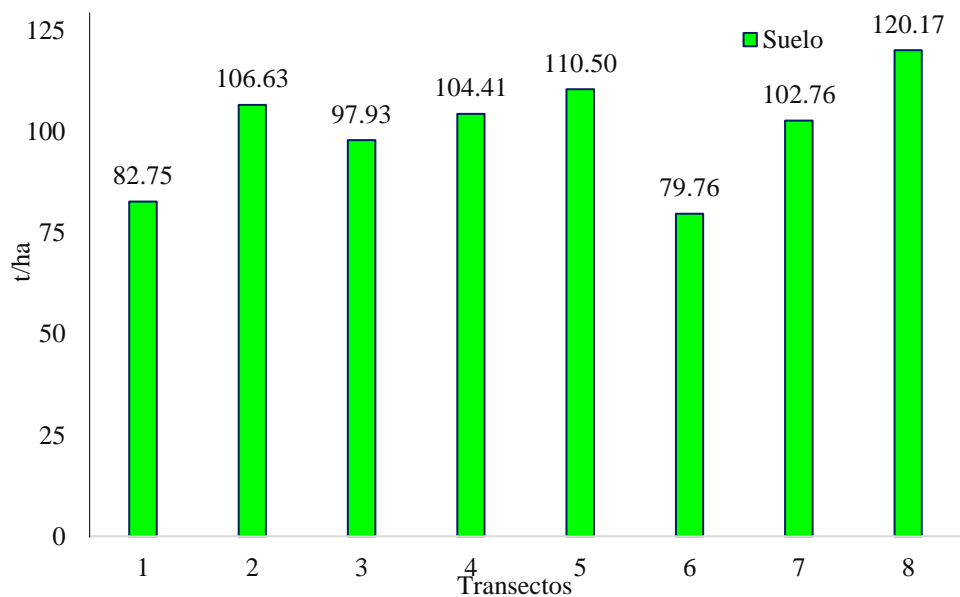


Figura 13. Contenido de carbono ($t \cdot ha^{-1}$) en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

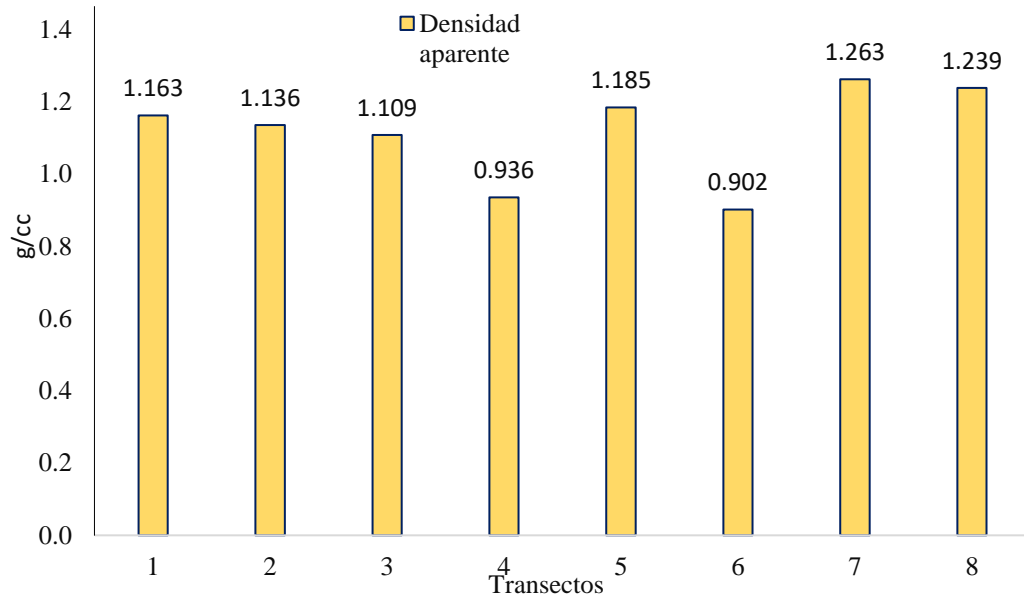


Figura 14. Densidad del suelo ($\text{g}\cdot\text{cc}^{-1}$) del cultivo de café como sistema agroforestal

Finalmente, el peso del volumen del suelo presenta un valor medio de 1 116,44 t/ha con valores que oscilan entre 902,3 – 1 262,9 t/ha (Figura 14).

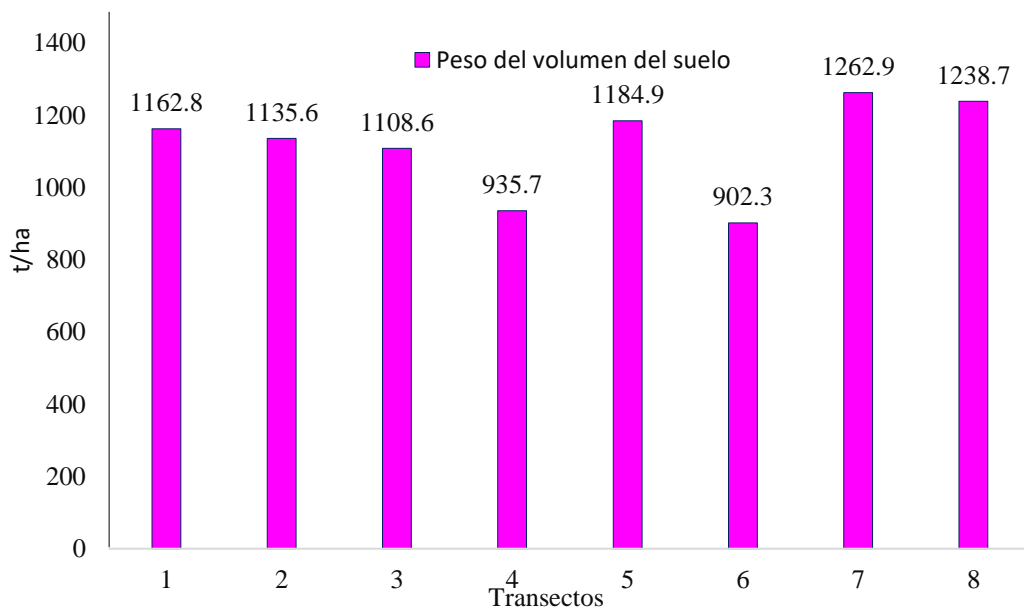


Figura 15. Peso del volumen ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) del suelo del cultivo de café como sistema agroforestal

4.3. Carbono total almacenado en el cultivo de café como sistema agroforestal

El análisis para el carbono total, resultante de la adición del carbono almacenado en la biomasa vegetal y el carbono del suelo, detalla que el total almacenado en el SAF registra un valor promedio de 157,07 t/ha, teniéndose un valor total de 56,46 t/ha en la biomasa vegetal y de 100,61 t/ha en el suelo (Figura 15); registros que concuerdan con la mención de Callo (2000), quien refiere que el almacenamiento del carbono en un SAF incluyendo los contenidos

del suelo se encuentra entre 12-228 t/ha; asimismo, se aproxima a los valores obtenidos por Abarca (2011), quien estimó para una SAF de café, 141,19 t/ha de C, con los valores totales obtenidos por Gonzales (2018) a una altitud de 1 400 msnm en un SAF de café – guaba con 99,1 t/ha; asimismo, Ávila (2001), refiere que la cuantificación estimada en SAF de café muestra valores similares a nuestro reporte teniéndose valores que oscilan entre 97,18 a 167,60 t C/ha a diferentes altitudes, observándose que el incremento del almacenamiento es proporcional a la altitud, también se tiene los valores de Ehrenbergerova et al. (2015), quienes refieren que en un monocultivo de café a 1 550 msnm registró 99,7 t/ha; sin embargo, el mismo autor detalla valores superiores al obtenido en la presente en SAF's de café asociados con *Eucalyptus spp.*, *Inga spp.* y *Pinus spp.*

Tabla 7. Valores promedio para el carbono total en el cultivo de café como sistema agroforestal

Carbono total en la biomasa vegetal (t/ha)	Carbono total en el suelo (t/ha)	Carbono total en el SAF (t/ha)
56,46	100,61	157,07

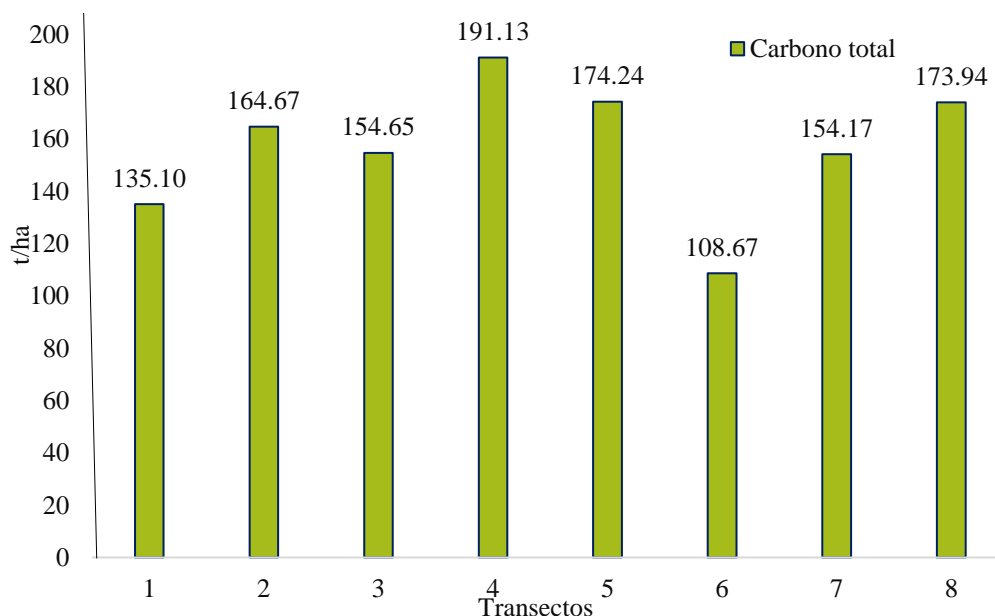


Figura 16. Contenido de carbono total ($t \cdot ha^{-1}$) en el cultivo de café como sistema agroforestal

Estos resultados permiten inferir que los sistemas agroforestales son una alternativa para garantizar el uso sostenido de las unidades productivas cafetaleras; asimismo, tal como lo menciona Cerda et al. (2016), los SAF's además de proveer varios servicios de ecosistemas, no reducen los rendimientos de café dentro del rango de cobertura de sombra. Por otro lado, una característica resaltante de los SAF's es que incluyen árboles forestales en su

composición haciéndolos muy similar a los bosques naturales, debido a esto se supone que existe un mayor potencial para el secuestro del carbono tanto en su estructura aérea como como subterránea en comparación con otras formas de uso de la tierra tal como los monocultivos o las áreas de pasto (Sánchez, 2000, Kirby y Potvin, 2007). Los SAF's permiten fomentar acciones sostenibles utilizando bajos insumos logrando minimizar la afectación de los suelos y las plantas, resalta la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes, los cuales aportan al almacenamiento de carbono a largo plazo (Nair, 2004). Finalmente, a pesar de que los SAF's no se diseñaron específicamente para capturar carbono, representan una importante alternativa para incrementar las reservas de carbono alrededor del planeta (Casanova et al. 2011 y Petit-Al-dana et al. 2012).

4.4. Determinación de los servicios ecosistémicos en el cultivo de café como sistema agroforestal

La tabla 8, describe los servicios ecosistémicos identificados en el cultivo de café como sistema agroforestal, teniéndose:

Tabla 8. Valores promedio para el carbono total en el cultivo de café como sistema agroforestal

Servicio ecosistémico	Descripción
Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa vegetal	Se ha verificado que el cultivo de café como sistema agroforestal a través de los árboles forestales, cafetos y otras formas de vegetación contribuyen a un mayor nivel de almacenamiento de carbono en comparación con monocultivos, aumentando el stock de carbono en el suelo y la biomasa. Asimismo, dada la mayor acumulación de carbono se incrementan los niveles de materia orgánica mejorando la estructura, la porosidad y retención hídrica.
Conservación del suelo	Se ha verificado que dentro de la parcela existe un mayor nivel de fertilidad, y humedad con lo que se reduce la erosión, para esto se determinó el color del suelo teniéndose que, los suelos dentro de la parcela presentan indicios de poseer mayores niveles de materia orgánica, siendo más oscuros, lo cual es una herramienta eficaz para restaurar suelos degradados. Además, la presencia de árboles fijadores de nitrógeno y de árboles o arbustos de raíces profundas, contribuyen a la estabilización del suelo y al aumento en la disponibilidad de nutrientes.
Aporte de biomasa y	Se ha verificado el aporte importante de biomasa en las especies arbóreas y los cafetos lo cual favorece el reciclaje de nutrientes, contribuyendo al aprovechamiento

reciclaje de nutrientes	superficial de nutrientes que se encuentran a mayores profundidades, lo cual evita la lixiviación.
Conservación del agua	Se ha comprobado y verificado que el cultivo de café como sistema agroforestal contribuye a un mayor nivel de captación del agua de lluvia, modificando la transpiración y la retención del agua en el suelo dada la presencia de árboles, lo cual disminuye la escorrentía e incrementa la infiltración.
Regulación del clima y generación de microclimas favorables	Se ha verificado que el cultivo de café como sistema agroforestal genera un microclima favorable provisto por la sombra de los árboles, donde la temperatura disminuye en un promedio de 0,17 a 2,52 °C, así como que incrementa la humedad relativa, teniéndose que dentro de la parcela se incrementa en promedio de 1,26 a 11,67 %.
Conservación de la biodiversidad	Servicio ligado a la dotación de hábitats y recursos de flora y fauna, por la humedad en la primera capa y la materia orgánica incremento la población de macroorganismos.
Mitigación y adaptación al cambio climático	El cultivo de café aporta para la reducción en la generación de gases de efecto invernadero, debido a la fotosíntesis que realiza las diferentes variedades bajo el SAF, es decir, el café con árboles sombra, mitigando y adaptándose al cambio climático. El cultivo de café como sistema agroforestal contribuye a evitar la deforestación debido a que provee productos maderables en tierras deforestadas, siendo una herramienta para llevar a cabo los programas de REDD+. Asimismo, el manejo adecuado de la parcela permite tener mayores niveles de tasas de acumulación de carbono, por lo que representa una efectiva herramienta para mitigar el cambio climático.

En la presente investigación, se verifica que los diversos elementos del SAF representan una reserva de dióxido de carbono (CO₂) acumulada a lo largo de años de fotosíntesis superando a valores de plantaciones con un único cultivo; a esto se tiene la mención de Harmand et al. (2006), quienes detallan que el secuestro de carbono en sistemas agroforestales con café es más intenso que plantaciones en monocultivo el cual superó en 29,8 Mg ha⁻¹ de carbono presente en la biomasa aérea de parcelas de café con árboles de sombra (maderables, frutales y de servicio) y musáceas, al compararse con los resultados a pleno sol (Pinoargote et al., 2016). Asimismo, Houghton (2006) refiere que los ecosistemas terrestres acumulan tres veces más carbono (1/5 en la vegetación, 4/5 en el suelo) que la atmósfera, por lo que los resultados obtenidos guardan coherencia al compararse con las premisas principales de la revisión del estado del arte.

Por otro lado, el servicio de conservación de suelos se configura en diversos aspectos como un mayor nivel de fertilidad y humedad reduciéndose así la erosión; los

resultados de la verificación de la calidad del suelo se realizaron utilizando la tabla de color de Munsell, teniéndose los siguientes resultados:

Tabla 9. Color del suelo registrado dentro de la parcela del cultivo de café como sistema agroforestal (de los primeros 10 cm.)

Transecto	Código	Descripción del color del suelo dentro de la parcela
A	10YR-3/2	Marrón muy oscuro
B	10YR-3/3	Marrón oscuro
C	10YR3/4	Marrón muy amarillento
D	75YR-3/0	Gris muy oscuro
E	75YR-3/2	Marrón oscuro
F	10YR-3/1	Gris muy oscuro
G	10YR-3/2	Marrón muy oscuro
H	10YR-2/1	Negro

Como se sabe, el color del suelo ayuda considerablemente a identificar el tipo de suelo en el campo, siendo un indicador de la oxidación o reducción química. Asimismo, es sabido que el color tiende a oscurecerse al incrementarse los niveles de materia orgánica; de acuerdo a la FAO (2009) el contenido de materia orgánica de los horizontes minerales se puede estimar mediante el color del suelo seco y/o húmedo en la tabla Munsell, tomando en cuenta su clase textural. Esta estimación se basa en la suposición de que el color del suelo (valor) es debido a la mezcla de sustancias orgánicas de color oscuro y minerales de color claro. Considerando esta premisa se puede inferir que el SAF tiende a incrementar el valor de la materia orgánica, lo cual puede verificarse en los niveles registrados en cada transecto.

En relación al aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en el SAF, la interacción de sus elementos es un proceso indispensable para mantener la fertilidad del suelo y asegurar la capacidad del sistema para generar aportes de biomasa de forma constante tal como lo menciona (Alfonso y Monedero, 2004). En ese contexto nuestros resultados coinciden con diversas investigaciones como la de Romero (2006), quien registró un importante aporte a la biomasa en los tratamientos con especies arbóreas, leguminosas en cultivos de cacao bajo sombra. Cabe mencionar que la presencia de especies arbóreas y arbustos de raíces profundas contribuyen al reciclaje de nutrientes, a través del aprovechamiento superficial de nutrientes que se encuentran a mayores profundidades, evitándose la lixiviación. Así, de acuerdo a Harmand et al. (2010), los árboles de sombra, por sus raíces profundas, favorecen el reciclaje de nutrientes; estos

autores encontraron hasta 1 570 kg.ha⁻¹ de nitrato acumulado en el subsuelo bajo café a profundidad entre 80-200 cm, y con lixiviaciones aún a profundidades mayores (hasta 380 cm), de acuerdo a su mención el nitrato acumulado en el subsuelo podría ser aprovechado en el sistema agroforestal (a través de árboles con raíces profundas) y ponerse a disponibilidad del cultivo a través de la materia orgánica (hojarasca) que los árboles regresan al suelo. Asimismo, de acuerdo a Villarreyña-Acuña (2016), en cafetales sombreados con *Erythrina poeppigiana* y otras especies, conservan de manera significativa una mayor cantidad de hojarasca y ramas en el suelo, en comparación con aquellos que se producen a pleno sol. Además, el contenido de carbono en el suelo tiende a incrementarse en relación directa al nivel de sombra, así como a la capacidad de retención de nutrientes (capacidad de intercambio catiónico) (Muschler, 1999).

En el cultivo de café como sistema agroforestal no existen estudios suficientes en relación al ciclo del agua dentro del mismo (Beer et al., 2003). En nuestro caso, coincidiendo con diversos autores, se verifica que las especies arbóreas y los cafetos, así como los diversos elementos vegetales dentro del SAF influyen en el ciclo del agua mediante el incremento de la interceptación del agua de lluvia, lo cual modifica la transpiración y retención de agua, reduciendo así el escurrimiento y aumentando la infiltración. Autores como Bharati et al. (2002), reportaron que la infiltración en tierra cultivada con maíz o soja, o en pastizales, fue cinco veces menor que en surcos de ribera cultivados con una variedad amplia de especies herbáceas y leñosas. Esto permite inferir que los sistemas más diversos contribuyen a la prevención del escurrimiento y la pérdida de nutrientes. A esto Chikowo et al. (2004), afirman que las microcuencas con bosques conservados o la cubierta de los SAF producen agua de mayor calidad.

Para modelizar la regulación del clima dentro del SAF del cultivo de café se midieron parámetros como temperatura, humedad relativa y niveles de luminosidad. En relación a la temperatura dentro de la SAF se tiene un máximo valor de 23,22°C y un mínimo de 21,1°C, los valores fuera de la parcela oscilan entre 22,32 – 24,47°C; en ese sentido, se tiene que la SAF contribuye a disminuir la temperatura en un promedio de 0,17 a 2,52 °C. Respecto a la humedad, se verifica que el SAF contribuye a aumentar los niveles de humedad, teniéndose incrementos que van desde 1,26 a 11,67 %. Asimismo, como se supone, el SAF disminuye el nivel de luminosidad que incide en los sistemas productivos, en nuestro caso, se verifica que se disminuye la incidencia desde 63x10x100 a 777x10x100 lm.

Tabla 10. Valores de temperatura, humedad relativa y luminosidad dentro y fuera de la parcela del cultivo de café como sistema agroforestal

Transecto	Dentro de la parcela			Fuera de la parcela		
	T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad
A	23,22	74	188,33x10x100	24,25	71,67	716,67x10x100
B	21,42	74,58	185,67x10x100	23,13	73,32	686,83x10x100
C	21,78	72,5	118,67x10x100	22,87	67,25	375,5x10x100
D	22,15	77	168,67x10x100	22,32	65,33	465,33x10x100
E	21,95	75,08	185,5x10x100	24,47	69,5	666,5x10x100
F	21,1	74,97	200,17x10x100	23,52	71,27	643,17x10x100
G	22,82	73,68	163,17x10x100	24,15	67,32	432,83x10x100
H	21,47	76,4	165x10x100	23,05	67,4	487,33x10x100

Respecto al efecto regulador del microclima por parte del cultivo de café como sistema agroforestal diversos estudios afirman que, los cambios que se suscitan bajo el dosel de la sombra instalada se deben principalmente a la cantidad y calidad de luz que entra al sistema, la temperatura, del suelo y del área foliar (hojas del cafeto), la velocidad del viento, la humedad del suelo y la evaporación del agua del suelo (IICA, 1988; Lin, 2007; Cannavo et al., 2011). Asimismo, Avelino y Rivas (2013) y Villarreyna-Acuña, (2016) refieren que existen cambios importantes en relación al impacto de la lluvia; es así como la radiación solar que llega a las plantas de café se disminuye de acuerdo al tipo de copa de los árboles (Beer et al., 1998; Lin, 2007; Siles et al., 2010). En el presente estudio, se verifica que la temperatura disminuye dentro del SAF, tal como lo mencionan Lin (2007); quien refiere que las temperaturas máximas de los elementos que interactúan disminuyen dentro del sistema; asimismo, se coincide con los resultados de la humedad relativa la cual tiende a aumentar dada la mayor retención hídrica y la producción del rocío.

Cabe mencionar que estas características contribuyen a regular la incidencia de plagas y enfermedades del cultivo; es así, tal como lo refiere Rapidel et al. (2015), que la sombra de las especies arbóreas, a través de su efecto regulador, ayuda a eliminar casi totalmente la antracnosis y contribuye en la reducción de la incidencia y afectividad de la roya del café. Al compararse una SAF de café se verificó la menor incidencia de la roya, así como la menor cantidad de ramas muertas y menos severidad de plagas y patógenos (Cerdeira et al., 2016). Asimismo, se coincide con Avelino et al. (2015), quienes sugieren que el impacto de la roya bajo sombra podría ser menor que en un monocultivo.

En referencia a la biodiversidad, el cultivo de café como sistema agroforestal contribuye a conservar diversas especies de flora y fauna, entre las que sobresalen por su importancia las aves, polinizadores o controladores biológicos, en esto se coincide con (Montagnini et al., 2015). Por otro lado, diversos autores han encontrado que, en parcelas de café sin asociación, se registraron hasta la mitad de la diversidad de aves, a diferencia de las SAF, donde las cuales encuentran su hábitat generalmente en doseles de bosque donde se maneja de forma tradicional el café bajo sombra. Asimismo, es importante mencionar que los sistemas agroforestales actúan como corredores biológicos, dado que las especies animales cruzan hábitats agropecuarios, asimismo, se promueve la conservación de la biodiversidad al actuar como zonas donde existe una importante dispersión de semillas (Jiménez et al., 2001). Cabe mencionar que, si bien, los sistemas agroforestales con el cultivo de café son importantes áreas que contribuyen a la conservación de la biodiversidad, no es factible compararlos y plantearlos como una propuesta que pueda reemplazar a bosques naturales.

V. CONCLUSIONES

1. La cantidad de carbono en la biomasa vegetal en el cultivo de café como sistema agroforestal en una parcela de 12 años de la variedad Caturra en la zona de Río Azul detalla que en las especies forestales registran $47,98 \text{ t.ha}^{-1}$; en los árboles de café con promedio de $1,09 \text{ t.ha}^{-1}$, en las herbáceas y arbustos con $0,81 \text{ t.ha}^{-1}$, para el caso de la hojarasca se tiene $5,66 \text{ t.ha}^{-1}$, y en las raíces en promedio se concentran en $0,92 \text{ t.ha}^{-1}$ en promedio.
2. La cantidad de carbono en el suelo del cultivo de café como sistema agroforestal en una parcela de 12 años de la variedad Caturra en la zona de Río Azul detalla que en promedio la densidad aparente del suelo es de $1,116 \text{ g.cc}^{-1}$; asimismo, aproximadamente se concentra $100,61 \text{ t. ha}^{-1}$ de C en la estructura de suelo el cual alcanza un peso del volumen del suelo de $1\ 116,44 \text{ t.ha}^{-1}$.
3. La cantidad total de carbono almacenado en el cultivo de café como sistema agroforestal fue de $157,07 \text{ t/ha}$, teniéndose un valor total promedio de $56,46 \text{ t/ha}$ en la biomasa vegetal y $100,61 \text{ t/ha}$ en el suelo.
4. El color mas oscuro de los suelos se encuentra en la primera capa de 0 a 10 cm, siendo entre marrón oscuro a negro o gris oscuro, y a medida que se profundisa el color se va haciendo mas amarillento o rojizo, así mismo la cantidad de raíces es mayor en la primera capa de 0 a 10 cm, siendo menor entre 20 a 30 cm. Con respecto a la densidad aparente del suelo en la primera capa en su mayoría es menor de $0,90 \text{ g/cc}$. Y en la capa de 20 a 30 cm es entre 1.15 a 1.37 g/cc .
5. los servicios ecosistémicos que brinda un sistema agroforestal de café con los árboles de sombra están centrado al mayor aporte de materia orgánica y generación de humus dentro de la parcela, así como a la generación de un microclima favorable con menor temperatura y mayor humedad, generando cierta cantidad de sombra que disminuye la luminosidad, siendo favorable para el rendimiento del café y la sostenibilidad del cultivo.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Uniformizar los criterios metodológicos para la determinación del carbono en ecosistemas en una zona específica, para esto es importante considerar variables exógenas como la altitud, las especies forestales asociadas, el grado de infestación de purmas y pastizales, la fenología del cultivo principal, la época de muestreo, entre otros.
2. Se recomienda tomar medidas de la luminosidad, temperatura, y humedad relativa en diferentes horarios como puede ser a las 8,0 am, 1pm, y 5 pm.
3. Se recomienda la socialización de los resultados obtenidos con la comunidad científica, autoridades ediles e instituciones públicas y privadas involucradas en la actividad agrícola y el manejo y conservación de bosques; a través de esto, se debe consolidar los registros de la presente para que sirvan como fuente de consulta para la realización de futuras investigaciones y para planes de inversión.
4. Dar continuidad a las investigaciones que buscan determinar el nivel de carbono y los servicios ecosistémicos, en la zona de estudio para consolidar los niveles y los criterios técnicos para la medición de carbono.

VII. REFERENCIAS

- Abarca, V. (2011). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal de café de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en Rio Azul. Tingo María. 62p. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS
- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J., Monreal, C. (2002). Método Para la Medición del Carbono Almacenado en la Parte Aérea de Sistemas con Vegetación Natural e Inducida en Terrenos de Ladera en México. INFAP. Colegio de Postgraduados, México. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales (18-20 de octubre, 2001, Valdivia, Chile).
- Agüero, J., Alvarado, A. (1983). Compactación y compactibilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 7 (1), pp. 27-33.
- Alegre, J., Arévalo, L., Ricse, A., Callo-Concha, D.; Palm, CH. (2002). Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú. IV Congreso Brasileño de Sistemas Agroflorestais. Brasil. pp,1-8
- Alfonso, C. Monedero, M. (2004). Uso, manejo y conservación de suelos. Asociación Cubana de técnicos agrícolas y forestales, La Habana, Cuba, 71 p.
- Alpizar, L., Fassbender, H., Heuvelop, J. (1983). Estudios de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE, Turrialba. Departamento de recursos naturales Renovables, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 14 p.
- Andrade, J., Marin, M., Pachón, P. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26(2), pp. 127–132.
- Andrasko, K. (1990). El Recalentamiento del Globo Terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. UNASYLVA. Pág. 41.
- Arévalo L., Alegre, J., 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.
- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. Hruska, C. Morales. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321. doi:10.1007/s12571-015-0446-9
- Avelino, J., Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del cafeto. HAL archives-ouvertes, FRA. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036/document>

- Ávila, G. (2001) Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8:32–35
- Balesdent, J. (1996). Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude de gestion des sols* 3 (4): pp. 245-260.
- Beer J.; Harvey C. A.; Ibrahim M.; Harmand J. M.; Somarriba E. (2003). Service functions of agroforestry systems. In : Congress proceedings. XII world forestry congress: Forests, source of life. Forests for the planet. Québec: Bibliothèque Nationale du Québec, p. 417-424. Congrès forestier mondial. 12, 2003-09-21/2003-09-28, Québec, Canada.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, pp. 139–164.
- Beltrán, D., Erazo, A. (2017). Captura de carbono en raíces finas y estructurales en bosques alto-andinos y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos en Santa Isabel, Tolima. [Tesis de pregrado, Universidad del Tolima]. Repositorio UT. <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/2417/1/T%202021%20565%20CD5869%20APROBADO%20DIEGO%20FELIPE%20BELTRA%CC%81N%20BARRERA.pdf>
- Bharati, L., Lee, K. H., Isenhardt, T. M., Schultz, R. C. (2002). Soil-water infiltration under crops, pasture and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems*, 56, 249-257. doi: 10.1023/A:1021344807285
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer. Roma, IT, FAO. 55 p.
- Brown, S., 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>)
- Callo, D. (2000). *Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio UACH.
- Callo-Concha, D., Krishnamurthy, L., Alegre, J. (2000). Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. Chapingo, México. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio UACH.
- Camacho, V. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio ciencias*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. AC. Mexico. REVISTA BIOCIENCIAS.

- Cambardella, C. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. In LAL L; KIMBLE J.M; FOLLETT R.A. Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Ratón pp. 519-526.
- Cannavo, P., J. Sansoulet, J.M. Harmand, P. Siles, E. Dreyer, Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140:1-13. doi: 10.1016/j.agee.2010.11.005.
- Casanova, F., Petit, J., Solorio, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), pp. 5–18.
- Castro, R. (2017). *Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con Coffea arabica (L.) en la zona de los Santos, Costa Rica*. [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio CORE. <https://core.ac.uk/download/pdf/153541483.pdf>
- Centeno, J. (1992). El Efecto Invernadero. *PLANIUC*. 18 – 19: pp. B 75-96.
- Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertoti, J., Avelino, J. (2016). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *Agronomy*, 3(3).
- Chávez, M.J. (2006). Estadísticas – Bondades del Cultivo de Cacao. 36 p.
- Chikowo, R., Mapfumo, P., Nyamugafata, P., Giller, K. E. (2004). Mineral N dynamics, leaching and nitrous oxide losses under maize following two-year improved fallows on a sandy loam soil in Zimbabwe. *Plant and Soil*, 259(1-2), 315-330. doi: 10.1023/B:PLSO.0000020977.28048.fd
- Clemente, E. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36 (2): 180 - 196. Disponible en: <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1797/2297>
- Clemente, E. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios – Perú. *Revista Forestal del Perú*, 37 (1): 54 – 68. Disponible en: <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1593>
- Costanza, R. (1997). La economía ecológica de la sostenibilidad. Invertir en capital natural. En: *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Más allá del Informe Brundtland*. Madrid: Ed. Trotta.

- Costanza, R., R. Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton, M. Van Den Belt (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Daily, G. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Systems*. Washington DC: Island Press.
- De Groot, R., Wilson, M., Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* (41): pp. 393-408
- Del Águila, A., Caldas, V. (2022). *Sistema agroforestal y servicios ambientales en el cultivo de café Caturro en Aucayacu distrito José Crespo y Castilla – provincia de Leoncio Prado- región Húanuco 2020-2021*. [Tesis de maestría, Instituto Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/6747/TESIS_MAESTRIA_DEL%20%20C%20%20GUILA_FIARN_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Delgado, V. (2014). Servicios Ecosistémicos y ambientales en la legislación chilena. *Actas de las VII Jornadas de Derecho Ambiental* (pp.533-559). Santiago: Centro de Derechos Ambientales, Universidad de Chile.
- Ehrenbergerova, L., Cienciala, E., Kucera, A., Guy, L., Habrova, H. (2015) Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforest Syst*, pp. 61-73.
- Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H. (1981). *Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species*. Random House, New York.
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A., Torres., A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182012000100006#:~:text=Los%20sistemas%20agroforestales%20almacen%20a%20proximadamente,1%20\(Schroeder%20%201994\).](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182012000100006#:~:text=Los%20sistemas%20agroforestales%20almacen%20a%20proximadamente,1%20(Schroeder%20%201994).)
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio – MEA (2005). *Panorama General: Evaluación de los Ecosistemas del Milenio*. Disponible en: <http://www.millenniumassessment.org/es/About.html>
- Fisher, M., Rao, I., Ayarza, M., Lascano, C., Sanz, J., Thomas, R. & Vera, R. (1994). Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature Publishing Group*, 371 (1), 236-238.

- Gayoso, J., Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en biomasa aérea de bosque nativo en Chile. *Bosque* 26(2): 33-38. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002005000200005
- Glave, M., Pizarro, R. (2001). Valoración Económica de la Diversidad Biológica y Servicios Ambientales en el Perú. Lima, Perú.
- Gonzales, J. (2018). Carbono almacenado en sistemas agroforestales de *Coffea arábica* L. “café” de 4 y 7 años en relación a 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., Liang, B.C. (1996). Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 60: 472 – 476.
- Haines-Young, R., Potschin, M. (2010). Proposal for a Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES) for Integrated Environmental and Economic Accounting. Department Of Economic And Social Affairs Statistics Division United Nations. Paper prepared by Centre for Environmental Management, University of Nottingham, United Kingdom. 23 pp. Report to the European Environment Agency, Background document.
- Harmand, J.M., H. Ávila, R. Oliver, L. Saint-André, Dambrine, E. (2010). The impact of kaolinite and oxi-hydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. *Geoderma* 158:216-224. doi:10.1016/j.geoderma.2010.04.032
- Harmand, J.M., K. Hergoualc’h, S. De-Miguel-Magaña, B. Dzib, P. Siles, Vaast, P. (2006). Carbon sequestration in coffee agroforestry plantations of Central America. In: ASIC, editor, 21st International Conference on Coffee Science. CIRAD, Montpellier, FRA. pp. 1071-1074.
- Hernández, L. (2001). Densidad de biomasa aérea en bloques extensos del neo trópico húmedo. México. 28 p.
- Houghton, J. 2006. *Global warming: The complete briefing*. 3rd ed. Cambridge University Press, GBR.
- Houghton, R., Woodwell, G. (1989). Cambio Climático Global. *Investigación y Ciencia*. 153 p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA. (1988). Curso regional sobre nutrición mineral del café. 7-18 nov. IICA/CATIE, San José, CRI.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. (2004). Climate change. spatial report on emissions scenarios. intergovernmental panel on climate change (IPCC). Disponible en: <http://grida.no/climate/ipcc>
- Jackson, M.L. (2004). Análisis Químico de Suelos. Ed. OMEGA S.S. Barcelona.
- Jara, RA. (2016). Almacenamiento de carbono en el suelo en dos tipos de sistemas agroforestales cacao (*Theobroma cacao* L.) y café (*Coffea arabica* L.) en Hermilio Valdizan. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1363>
- Jiménez, C., Arias, D. (2004). Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en un gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica. *Kurú*, 1 (2), 9-12
- Jiménez, F., Muschler, R. Köpsell, E. (2001). Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica, 1-26.
- Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76:1-10. doi:10.1007/s10457-009-9229-7.
- Kirby, KR., Potvin, C. (2007). Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink Proj-ect. *Forest Ecology and Management* 246(2–3):208–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.072>
- Leblanc, H., Russo, R., Cueva, J.J., Subia, E. (2006). Fijación de carbono en Cacao, en la región tropical de Costa Rica. Universidad EARTH. 202 p.
- Lin, B.B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agric For. Meteorol.* 144:85-94. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.12.009.
- 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. 60 p.
- Martínez, H.; Fuentes, E.; Acevedo H. 2008 Carbono orgánico y propiedades del suelo, Facultad de Ciencias Agronómicas - Universidad de Chile, pp. 69-76.
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., Eibl, B. (2015). *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Cali, Colombia: Fundación CIPAV.
- Muños, M. (2006). Dinámica del Carbono Orgánico del Suelo en Ecosistemas de la Zona Mediterránea de Chile. Para optar al Grado Académico de Doctor en Ciencias de Recursos Naturales, Temuco – Chile, pp. 44 – 45
- Muschler, R.G. (1999). Árboles en cafetales. CATIE, Turrialba, CRI.

- Nair, PKR. (2004). Agroforestry: trees in support of sustainable agriculture. In Hillel, H; Rosenzweig, C; Powlson, D; Scow, K; Singer, M; Sparks, D (eds.). Encyclopedia of soils in the environment. Londres, Reino Unido, Elsevier. pp. 35-44.
- Odar, B. (2018). *Evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (Coffea spp.) en el anexo de Vilaya, distrito de Colcamar, provincia de Luya, Amazonas, 2017-2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1384/Berlin%20Alexander%20Odar%20Rojas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ordoñez A. (1999). Captura de carbono en un bosque templado. El caso de San Juan Nuevo. Michigan. Instituto Nacional de Ecología SEMARNAP. México D.F. 72 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación – FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia. 4° ed. 111 p. Disponible en: <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (1998). Agroforestería para la producción animal en América Latina. [En línea] www.fao.org/documentos. 22 de abril del 2009.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (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. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Paris, Francia. 62 p.
- Petit-Aldana, J; Uribe-Valle, G; Casanova-Lugo, F; Solorio-Sánchez, J; Ramírez-Áviles, L. (2012). Descomposición y liberación de nitrógeno y materia orgánica en hojas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Guazuma ulmifolia* Lam. y *Moringa oleifera* Lam. en un banco mix-to de forraje. Revista Chapingo (Serie ciencias forestales y del ambiente) 18(1):5–25. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.03.025>
- Philpott, SM; Bichier, P; Rice, R; Greenberg, R. (2007). Field-testing ecological and economic benefits of coffee certification programs. *Conservation Biology* 21(4):975-985.
- Pinoargote, M., R. Cerda, L. Mercado, A. Aguilar, M. Barrios, Somarriba, E. (2016). Carbon stocks, net cash flow and family benefits from four small coffee plantation types in Nicaragua. *For. Trees Livelihoods* 26:183-198. doi:10.1080/14728028.2016.1268544

- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO – PNUD (1997). Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. pp. 2–4.
- Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J. (1995). Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449 – 459.
- Rajagopal, R. I. (2004). Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio UACH.
- Rapidel, B., A. Ripoché, C. Allinne, A. Metay, O. Deheuvels, N. Lamanda, J.M. Blazy, H. Valdés-Gómez, and C. Gary. (2015). Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agron. Sustain. Dev.* 35:1373-1390. doi:10.1007/s13593-015-0317-y
- Ríos, A. J. (2007). Almacenamiento de carbono e valoración económica en sistemas de uso – da - terra comparados con o de cultivo de coca (*Erythroxylon coca* Lam) no distrito de José Crespo y Castillo, Perú – Belem (PA) – Brasil 2007. 125 p.
- Robert, M. (2001). Soil carbón sequestration forimprovement land management. FAO. World Soil Resources Report N° 96. Rome.
- Robert, M. (2002). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organismo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 83 p.
- Romanoff, S. (2010). Shade Coffee in Biological Corridors: Potential Results at the Landscape Level in El Salvador. *Culture and Agriculture* 32(1):27-41.
- Romero, S. (2006). Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. Caturra), con tres niveles de manejo (tesis de posgrado). [Tesis de posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE.
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., Porro R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales 1° ed. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 2009. 79 p. Disponible en: http://www.aecidcf.org.co/Ponencias/2016/septiembre/MI120916-1/Ref.7.Guia_Carbono.pdf
- Salisbury, F.B. (1999). Fisiología Vegetal. Editorial Iberoamérica. México. 759 p.
- Sanchez, PA. 2000. Linking climate change research with food security and poverty reduction in the tropics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82(1–3):371–383. Disponible

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.521.217&rep=rep1&type=pdf>

- Sánchez-Clavijo, LM; Botero, JE; Espinosa, R. (2008). Assessing the value of shade coffee for bird conservation in the Colombian Andes at a local, regional, and national level. Actas, Fourth International Partners in Flight Conference: Tundra to Tropics. [McAllen, Texas, EE.UU., 13-16 feb. 2008]. pp. 148-157.
- Siles, P., J.M. Harmand, Vaast, P. (2010). Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agrofor. Syst.* 78:269-286. doi:10.1007/s10457-009-9241-y
- Soto-Pinto, L; Perfecto, I; Castillo-Hernandez, J; Caballero-Nieto, J. (2000). Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80(1-2): pp. 61-69.
- Suárez, D. (2002). Cuantificación Económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistema agroforestales de café en la Comarca Yasicc sur, Matagalpa, Nicaragua. [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE
- Toledo, VM; Moguel, P. (2012). Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. *Journal of Sustainable Agriculture* 36(3):pp. 353-377.
- Unep, Gens. (1992). Los gases que producen el efecto invernadero. Sánchez – Vélez y Geròn D. traductores. Universidad Autónoma de Chapingo. México 41p.
- Villarreyana-Acuña, R.A. (2016). Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fisiológico del cafeto. CATIE, Turrialba, CRI.
- Walkley, A; Black, C. (1938). An examination of the Degtjareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 38 p.
- Zanabria, R., Cuellar, J. (2015). Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino, Valle del Mantaro, Junín. *Xilema*, 28 (1): pp. 43-52
- 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 de doctorado, Universidad Nacional Federico Villareal]. Repositorio UNFV.
- Zavala, J., Mansilla, L. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Investigación y

Amazonía, Tingo María, Perú; 8(5): 1-8. Disponible en:
<https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200>

ANEXOS

Tabla 11. Biomasa y carbono del componente arbóreo de la parcela de café en Río Azul

Localidad	Transecto	Arboles F	Circunf. (cm)	DAP (cm)	Biomasa (kg/árbol)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	A	1	75	23,873	362,633	976,390	97,639	43,938
RÍO AZUL		2	56	17,825	173,172			
RÍO AZUL		3	81	25,783	440,585			
RÍO AZUL	B	1	61	19,417	215,004	1116,070	111,607	50,223
RÍO AZUL		2	54	17,189	157,950			
RÍO AZUL		3	95	30,239	659,482			
RÍO AZUL		4	42	13,369	83,634			
RÍO AZUL	C	1	52	16,552	143,566	1060,011	106,001	47,700
RÍO AZUL		2	60	19,099	206,198			
RÍO AZUL		3	52	16,552	143,566			
RÍO AZUL		4	42	13,369	83,634			
RÍO AZUL		5	84	26,738	483,047			
RÍO AZUL	D	1	58	18,462	189,250	1707,239	170,724	76,826
RÍO AZUL		2	62	19,735	224,034			
RÍO AZUL		3	124	39,470	1293,956			
RÍO AZUL	E	1	86	27,375	512,677	1223,159	122,316	55,042
RÍO AZUL		2	90	28,648	575,170			
RÍO AZUL		3	41	13,051	78,687			
RÍO AZUL		4	36	11,459	56,625			
RÍO AZUL	F	1	54	17,189	157,950	470,724	47,072	21,183
RÍO AZUL		2	47	14,961	111,166			
RÍO AZUL		3	38	12,096	64,925			
RÍO AZUL		4	51	16,234	136,683			
RÍO AZUL	G	1	84	26,738	483,047	968,046	96,805	43,562
RÍO AZUL		2	54	17,189	157,950			
RÍO AZUL		3	72	22,918	327,050			
RÍO AZUL	H	1	101	32,149	770,009	1008,106	100,811	45,365
RÍO AZUL		2	56	17,825	173,172			
RÍO AZUL		3	38	12,096	64,925			

Tabla 12. Biomasa y carbono en los cafetos de la parcela de café en Río Azul

Localidad	Transecto	Cafeto	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg/cafeto)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	A	1	2,3	4,44	1,088	22,88134235	2,28813424	1,02966041
RÍO AZUL		2	1,8	4,16	0,749			
RÍO AZUL		3	2,8	4,09	1,291			
RÍO AZUL		4	1,6	4,64	0,715			
RÍO AZUL		5	1,9	5,06	0,966			
RÍO AZUL		6	1,3	4,94	0,583			
RÍO AZUL		7	2,6	4,57	1,306			
RÍO AZUL		8	1,9	4,89	0,935			
RÍO AZUL		9	1,8	4,95	0,883			
RÍO AZUL		10	2,2	6,36	1,446			
RÍO AZUL		11	2,3	5,43	1,317			
RÍO AZUL		12	2,6	5,86	1,654			
RÍO AZUL		13	2,1	5,29	1,144			
RÍO AZUL		14	1,8	5,32	0,946			
RÍO AZUL		15	2,2	5,92	1,351			
RÍO AZUL		16	1,5	4,65	0,660			
RÍO AZUL		17	1,7	5,36	0,886			
RÍO AZUL		18	1,9	4,57	0,877			
RÍO AZUL		19	2,9	5,62	1,826			
RÍO AZUL		20	2,6	5,59	1,582			
RÍO AZUL		21	1,6	4,37	0,676			
RÍO AZUL	B	1	1,3	4,75	0,562	23,89768221	2,38976822	1,0753957
RÍO AZUL		2	2,6	5,05	1,436			
RÍO AZUL		3	1,7	4,82	0,801			
RÍO AZUL		4	2,3	5,31	1,289			
RÍO AZUL		5	2,2	4,97	1,144			
RÍO AZUL		6	1,4	3,74	0,492			
RÍO AZUL		7	1,9	4,49	0,862			
RÍO AZUL		8	1,5	4,73	0,671			
RÍO AZUL		9	1,9	4,67	0,895			
RÍO AZUL		10	1,6	4,49	0,693			
RÍO AZUL		11	1,2	3,24	0,353			
RÍO AZUL		12	2,4	3,47	0,908			
RÍO AZUL		13	2,3	3,96	0,976			
RÍO AZUL		14	1,4	5,14	0,665			
RÍO AZUL		15	1,6	4,18	0,648			
RÍO AZUL		16	1,6	4,87	0,749			
RÍO AZUL		17	2,5	6,13	1,643			
RÍO AZUL		18	1,6	2,35	0,375			
RÍO AZUL		19	2,2	5,85	1,336			
RÍO AZUL		20	1,8	4,67	0,836			
RÍO AZUL		21	2,1	6,15	1,320			
RÍO AZUL		22	2,8	3,98	1,258			
RÍO AZUL		23	1,5	2,26	0,333			
RÍO AZUL		24	2,6	5,83	1,646			
RÍO AZUL		25	1,7	2,34	0,403			
RÍO AZUL		26	2,4	4,52	1,168			

Localidad	Transecto	Cafeto	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg/cafeto)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL		27	1	5,17	0,436			
RÍO AZUL	C	1	1,7	2,33	0,402	26,90611312	2,69061131	1,21077509
RÍO AZUL		2	1,9	4,14	0,798			
RÍO AZUL		3	2,3	1,62	0,417			
RÍO AZUL		4	2,8	3,34	1,065			
RÍO AZUL		5	2,6	5,79	1,635			
RÍO AZUL		6	2,3	5,29	1,284			
RÍO AZUL		7	1,5	2,58	0,377			
RÍO AZUL		8	2,8	2,06	0,673			
RÍO AZUL		9	1,6	4,72	0,727			
RÍO AZUL		10	2,6	5,01	1,425			
RÍO AZUL		11	1,9	7,99	1,491			
RÍO AZUL		12	2,1	2,95	0,657			
RÍO AZUL		13	2,6	3,75	1,082			
RÍO AZUL		14	1,6	4,41	0,682			
RÍO AZUL		15	1,6	5,87	0,894			
RÍO AZUL		16	2,5	2,36	0,663			
RÍO AZUL		17	1,8	4,34	0,780			
RÍO AZUL		18	1,5	1,77	0,264			
RÍO AZUL		19	1,9	4,42	0,850			
RÍO AZUL		20	2,8	5,86	1,817			
RÍO AZUL		21	1,5	2,78	0,405			
RÍO AZUL		22	2,2	3,45	0,809			
RÍO AZUL		23	2,3	1,53	0,395			
RÍO AZUL		24	1,9	2,55	0,504			
RÍO AZUL		25	2,6	5,12	1,455			
RÍO AZUL		26	2,4	4,73	1,219			
RÍO AZUL		27	2,5	5,15	1,392			
RÍO AZUL		28	2,7	4,57	1,370			
RÍO AZUL		29	2,8	4,36	1,372			
RÍO AZUL	D	1	1,4	3,75	0,493	23,73618346	2,37361835	1,06812826
RÍO AZUL		2	1,6	4,43	0,684			
RÍO AZUL		3	1,6	3,76	0,586			
RÍO AZUL		4	2,5	4,04	1,105			
RÍO AZUL		5	1,9	4,38	0,842			
RÍO AZUL		6	1,9	3,53	0,686			
RÍO AZUL		7	1,9	3,73	0,723			
RÍO AZUL		8	1,7	3,63	0,612			
RÍO AZUL		9	1,8	3,72	0,673			
RÍO AZUL		10	2,3	3,38	0,839			
RÍO AZUL		11	1,7	4,24	0,709			
RÍO AZUL		12	1,3	3,85	0,460			
RÍO AZUL		13	1,7	3,14	0,533			
RÍO AZUL		14	2,6	4,42	1,265			
RÍO AZUL		15	1,6	4,34	0,671			
RÍO AZUL		16	2,2	3,85	0,898			
RÍO AZUL		17	1,5	3,13	0,453			
RÍO AZUL		18	2,1	4,65	1,012			
RÍO AZUL		19	1,8	4,47	0,802			

Localidad	Transecto	Cafeto	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg/cafeto)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL		20	1,6	3,91	0,608			
RÍO AZUL		21	1,8	4,89	0,873			
RÍO AZUL		22	2	3,32	0,691			
RÍO AZUL		23	2,3	5,04	1,227			
RÍO AZUL		24	1,8	3,31	0,603			
RÍO AZUL		25	2,3	3,45	0,856			
RÍO AZUL		26	1,3	4,36	0,518			
RÍO AZUL		27	3,1	4,53	1,619			
RÍO AZUL		28	1,6	4,18	0,648			
RÍO AZUL		29	1,7	3,73	0,628			
RÍO AZUL		30	2,5	5,25	1,418			
RÍO AZUL		1	2,5	4,61	1,253			
RÍO AZUL		2	2,1	3,91	0,859			
RÍO AZUL		3	2,5	5,25	1,418			
RÍO AZUL		4	3,1	5,03	1,789			
RÍO AZUL		5	2,7	4,98	1,487			
RÍO AZUL		6	2,5	4,38	1,193			
RÍO AZUL		7	2,4	3,71	0,968			
RÍO AZUL		8	2,1	3,99	0,875			
RÍO AZUL		9	2,6	4,95	1,409			
RÍO AZUL		10	1,7	2,93	0,499			
RÍO AZUL		11	1,3	3,19	0,385			
RÍO AZUL		12	2,3	3,45	0,856			
RÍO AZUL		13	2,7	3,31	1,009			
RÍO AZUL		14	1,4	3,45	0,456			
RÍO AZUL		15	1,5	3,15	0,456			
RÍO AZUL	E	16	2,2	4,45	1,030	26,37734312	2,63773431	1,18698044
RÍO AZUL		17	2,6	4,02	1,156			
RÍO AZUL		18	1,8	3,64	0,660			
RÍO AZUL		19	1,4	3,63	0,478			
RÍO AZUL		20	1,6	3,97	0,617			
RÍO AZUL		21	1,7	2,79	0,476			
RÍO AZUL		22	1,5	4,09	0,585			
RÍO AZUL		23	1,6	4,39	0,679			
RÍO AZUL		24	1,2	6,92	0,726			
RÍO AZUL		25	1,3	3,55	0,426			
RÍO AZUL		26	1,9	4,45	0,855			
RÍO AZUL		27	1,6	3,98	0,618			
RÍO AZUL		28	1,5	4,19	0,598			
RÍO AZUL		29	1,9	4,74	0,908			
RÍO AZUL		30	1,9	2,74	0,539			
RÍO AZUL		31	2,4	4,31	1,116			
RÍO AZUL		1	2,1	3,44	0,760			
RÍO AZUL		2	2,6	4,68	1,336			
RÍO AZUL		3	1,8	3,19	0,582			
RÍO AZUL	F	4	2,2	4,22	0,979	22,8863937	2,28863937	1,02988772
RÍO AZUL		5	1,9	4,49	0,862			
RÍO AZUL		6	1,5	3,49	0,503			
RÍO AZUL		7	1,7	4,54	0,757			

Localidad	Transecto	Cafeto	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg/cafeto)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL		8	1,8	5,81	1,028			
RÍO AZUL		9	2,6	4,98	1,417			
RÍO AZUL		10	1,3	3,96	0,473			
RÍO AZUL		11	1,4	3,38	0,447			
RÍO AZUL		12	1,4	5,29	0,684			
RÍO AZUL		13	1,8	4,35	0,781			
RÍO AZUL		14	1,6	4,45	0,687			
RÍO AZUL		15	1,7	4,86	0,807			
RÍO AZUL		16	1,8	6,12	1,081			
RÍO AZUL		17	2,4	4,52	1,168			
RÍO AZUL		18	1,7	4,57	0,761			
RÍO AZUL		19	2,6	4,88	1,390			
RÍO AZUL		20	1,6	5,75	0,877			
RÍO AZUL		21	1,5	4,13	0,590			
RÍO AZUL		22	1,8	4,83	0,863			
RÍO AZUL		23	1,8	5,04	0,899			
RÍO AZUL		24	1,6	4,55	0,702			
RÍO AZUL		25	2,8	5,53	1,720			
RÍO AZUL		26	1,9	3,78	0,732			
RÍO AZUL		1	1,4	5,08	0,658			
RÍO AZUL		2	1,7	5,56	0,917			
RÍO AZUL		3	2,1	3,76	0,827			
RÍO AZUL		4	1,7	4,68	0,779			
RÍO AZUL		5	1,7	5,61	0,925			
RÍO AZUL		6	2,6	4,52	1,293			
RÍO AZUL		7	2,4	5,93	1,511			
RÍO AZUL		8	1,3	4,86	0,574			
RÍO AZUL		9	1,9	3,93	0,760			
RÍO AZUL		10	1,7	4,57	0,761			
RÍO AZUL		11	1,5	5,51	0,776			
RÍO AZUL	G	12	2,2	5,46	1,251	21,43151246	2,14315125	0,96441806
RÍO AZUL		13	1,7	5,19	0,859			
RÍO AZUL		14	2,2	4,84	1,116			
RÍO AZUL		15	1,7	4,75	0,790			
RÍO AZUL		16	1,5	4,28	0,610			
RÍO AZUL		17	2,7	3,92	1,184			
RÍO AZUL		18	1,5	4,82	0,683			
RÍO AZUL		19	2,9	5,42	1,764			
RÍO AZUL		20	1,6	5,15	0,790			
RÍO AZUL		21	1,4	3,43	0,453			
RÍO AZUL		22	1,6	5,51	0,842			
RÍO AZUL		23	1,4	5,73	0,738			
RÍO AZUL		24	1,6	3,65	0,569			
RÍO AZUL		1	1,8	4,73	0,846			
RÍO AZUL		2	2,3	4,29	1,053			
RÍO AZUL	H	3	1,9	4,91	0,939	25,46986379	2,54698638	1,14614387
RÍO AZUL		4	1,5	3,75	0,538			
RÍO AZUL		5	1,6	3,42	0,535			
RÍO AZUL		6	1,8	5,24	0,932			

Localidad	Transecto	Cafeto	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg/cafeto)	Biomasa (kg/100m ²)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL		7	1,4	4,53	0,590			
RÍO AZUL		8	1,4	5,14	0,665			
RÍO AZUL		9	1,6	4,13	0,640			
RÍO AZUL		10	1,5	3,73	0,536			
RÍO AZUL		11	1,6	4,19	0,649			
RÍO AZUL		12	1,7	4,16	0,696			
RÍO AZUL		13	2,4	4,71	1,214			
RÍO AZUL		14	1,9	3,91	0,756			
RÍO AZUL		15	1,9	4,47	0,859			
RÍO AZUL		16	1,9	3,76	0,729			
RÍO AZUL		17	2,2	4,96	1,142			
RÍO AZUL		18	1,7	5,71	0,941			
RÍO AZUL		19	3,2	6,29	2,303			
RÍO AZUL		20	1,6	2,85	0,450			
RÍO AZUL		21	1,8	5,77	1,022			
RÍO AZUL		22	1,8	5,12	0,912			
RÍO AZUL		23	1,5	5,26	0,742			
RÍO AZUL		24	1,5	6,02	0,844			
RÍO AZUL		25	2,6	5,51	1,560			
RÍO AZUL		26	1,6	4,02	0,624			
RÍO AZUL		27	1,6	5,14	0,788			
RÍO AZUL		28	2,1	5,31	1,148			
RÍO AZUL		29	1,7	4,91	0,815			

Tabla 13. Biomasa y carbono herbáceo-arbustivo de la parcela de café en Río Azul

Localidad	Transecto	PFT (g)	PFM (g)	PSM (g)	Biomasa (ton/ha)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	A1	701,87	57,44	21,85	2,670	2,49302825	1,12186271
RÍO AZUL	A2	914,85	65,37	16,55	2,316		
RÍO AZUL	B1	640,65	48,14	12,52	1,666	1,17893325	0,53051996
RÍO AZUL	B2	500,85	75,45	10,42	0,692		
RÍO AZUL	C1	818,75	65,85	9,37	1,165	0,89078865	0,40085489
RÍO AZUL	C2	368,17	52,25	8,75	0,617		
RÍO AZUL	D1	840,81	84,70	25,40	2,521	2,71916244	1,2236231
RÍO AZUL	D2	1024,32	67,60	19,25	2,917		
RÍO AZUL	E1	753,85	50,60	10,55	1,572	1,60625824	0,72281621
RÍO AZUL	E2	635,30	48,40	12,50	1,641		
RÍO AZUL	F1	957,25	70,43	10,85	1,475	1,40320743	0,63144335
RÍO AZUL	F2	481,18	93,22	25,80	1,332		
RÍO AZUL	G1	874,40	61,78	14,63	2,071	1,64060725	0,73827326
RÍO AZUL	G2	682,25	72,42	12,85	1,211		
RÍO AZUL	H1	955,15	62,35	10,87	1,665	2,33525732	1,05086579
RÍO AZUL	H2	1148,24	55,40	14,50	3,005		

Tabla 14. Biomasa y carbono de la hojarasca de la parcela de café en Río Azul

Localidad	Transecto	PFTH (g)	PFH (g)	PSH (g)	Biomasa (ton/ha) por muestra	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	A1	414,68	98,45	68,56	11,5512284	11,6354847	5,2359681
RÍO AZUL	A2	450,47	97,03	63,11	11,719741		
RÍO AZUL	B1	464,87	116,9	69,77	11,0980256	11,529137	5,18811164
RÍO AZUL	B2	411,69	88,78	64,48	11,9602483		
RÍO AZUL	C1	516,57	77,5	56,35	15,0238552	14,6206137	6,57927617
RÍO AZUL	C2	519,62	86,21	58,97	14,2173722		
RÍO AZUL	D1	628,1	113,50	73,60	16,2918626	14,5450552	6,54527483
RÍO AZUL	D2	585,5	103,30	56,45	12,7982478		
RÍO AZUL	E1	584,3	80,75	52,57	15,2156785	13,0855124	5,88848056
RÍO AZUL	E2	460,7	110,80	65,87	10,9553462		
RÍO AZUL	F1	451,3	83,86	58,98	12,6962433	11,4507033	5,15281649
RÍO AZUL	F2	380,2	97,58	65,48	10,2051634		
RÍO AZUL	G1	482,3	132,80	70,35	10,2198208	11,8901806	5,35058128
RÍO AZUL	G2	578,4	98,58	57,78	13,5605405		
RÍO AZUL	H1	465,5	92,56	59,76	12,0217286	11,9045644	5,35705396
RÍO AZUL	H2	475,7	82,15	50,89	11,7874001		

Tabla 15. Biomasa y carbono radicular de la parcela de café en Río Azul

Localidad	Transecto	Prof.	PFRT (g)	PFR (g)	PSR (g)	PSR (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Biomasa por muestra (ton/ha)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	A1	0-10	331,15	44,33	15,18	0,01518	0.6072	2,5892	2,2664	1,01988
RÍO AZUL	A1	10-20	282,57	53,41	21,11	0,02111	0.8444			
RÍO AZUL	A1	20-30	229,77	72,4	28,44	0,02844	1.1376			
RÍO AZUL	A2	0-10	479,55	42,85	10,59	0,01059	0.4236	1,9436		
RÍO AZUL	A2	10-20	265,87	13,3	23,16	0,02316	0.9264			
RÍO AZUL	A2	20-30	37,47	44,57	14,84	0,01484	0.5936			
RÍO AZUL	B1	0-10	271,73	42,6	28,28	0,02828	1.1312	2,4096	2,2694	1,02123
RÍO AZUL	B1	10-20	362,25	68,88	22,78	0,02278	0.9112			
RÍO AZUL	B1	20-30	430,57	74,81	9,18	0,00918	0.3672			
RÍO AZUL	B2	0-10	191,71	11,42	20,76	0,02076	0.8304	2,1292		
RÍO AZUL	B2	10-20	481,28	99,69	14,41	0,01441	0.5764			
RÍO AZUL	B2	20-30	119,92	61,57	18,06	0,01806	0.7224			
RÍO AZUL	C1	0-10	53,54	59,56	21,28	0,02128	0.8512	2,8584	1,8412	0,82854
RÍO AZUL	C1	10-20	284,25	66,37	21,16	0,02116	0.8464			
RÍO AZUL	C1	20-30	260,21	41,25	29,02	0,02902	1.1608			
RÍO AZUL	C2	0-10	237,15	52,02	7,9	0,0079	0.316	0,824		
RÍO AZUL	C2	10-20	480,35	12,38	7,12	0,00712	0.2848			
RÍO AZUL	C2	20-30	128,14	41,89	5,58	0,00558	0.2232			
RÍO AZUL	D1	0-10	270,47	78,24	24,66	0,02466	0.9864	2,356	2,3458	1,05561
RÍO AZUL	D1	10-20	136,25	79,98	28,74	0,02874	1.1496			
RÍO AZUL	D1	20-30	311,87	89,41	5,5	0,0055	0.22			
RÍO AZUL	D2	0-10	460,36	10,14	21,33	0,02133	0.8532	2,3356		
RÍO AZUL	D2	10-20	319,15	71,16	14,85	0,01485	0.594			
RÍO AZUL	D2	20-30	190,24	64,86	22,21	0,02221	0.8884			
RÍO AZUL	E1	0-10	395,57	80,26	27,47	0,02747	1.0988	2,008	2,003	0,90135
RÍO AZUL	E1	10-20	125,78	60,40	15,94	0,01594	0.6376			
RÍO AZUL	E1	20-30	35,17	15,18	6,79	0,00679	0.2716			

Localidad	Transecto	Prof.	PFRT (g)	PFR (g)	PSR (g)	PSR (kg)	Biomasa por estrato (ton/ha)	Biomasa por muestra (ton/ha)	Biomasa (ton/ha)	Carbono (ton/ha)
RÍO AZUL	E2	0-10	245,46	95,65	28,80	0,0288	1,152	1,998		
RÍO AZUL	E2	10-20	98,88	40,91	16,59	0,01659	0,636			
RÍO AZUL	E2	20-30	33,97	10,68	4,56	0,00456	0,1824			
RÍO AZUL	F1	0-10	385,55	89,55	24,22	0,02422	0,9688	1,8708	2,0486	0,92187
RÍO AZUL	F1	10-20	95,82	40,66	16,92	0,01692	0,6768			
RÍO AZUL	F1	20-30	21,31	10,65	5,63	0,00563	0,2252			
RÍO AZUL	F2	0-10	385,18	66,20	28,40	0,0284	1,136	2,2264		
RÍO AZUL	F2	10-20	128,21	45,72	18,69	0,01869	0,7476			
RÍO AZUL	F2	20-30	70,59	21,53	8,57	0,00857	0,3428			
RÍO AZUL	G1	0-10	295,95	86,88	26,59	0,02659	1,0636	1,6944	1,7604	0,79218
RÍO AZUL	G1	10-20	83,99	25,58	11,46	0,01146	0,4584			
RÍO AZUL	G1	20-30	27,12	9,72	4,31	0,00431	0,1724			
RÍO AZUL	G2	0-10	317,95	80,61	24,64	0,02464	0,9856	1,8264		
RÍO AZUL	G2	10-20	140,67	60,42	15,63	0,01563	0,6252			
RÍO AZUL	G2	20-30	66,16	10,77	5,39	0,00539	0,2156			
RÍO AZUL	H1	0-10	289,73	91,33	24,82	0,02482	0,9928	1,7776	1,9006	0,85527
RÍO AZUL	H1	10-20	105,24	31,04	12,88	0,01288	0,5152			
RÍO AZUL	H1	20-30	34,39	15,41	6,74	0,00674	0,2696			
RÍO AZUL	H2	0-10	396,66	84,96	28,47	0,02847	1,1388	2,0236		
RÍO AZUL	H2	10-20	126,29	51,85	15,27	0,01527	0,6108			
RÍO AZUL	H2	20-30	39,66	14,8	6,85	0,00685	0,274			

Tabla 16. Densidad aparente, peso del volumen seco y carbono del suelo de la parcela de café en Río Azul

TRANS	COD	PROF (cm)	Ps (m)	Pfresco suelo	Pseco suelo	VC	DA (g/cc) por estrato	DA (g/cc) por muestra	DA (g/cc)	M.O. (%)	Peso del volumen de suelo (t/ha) por estrato	Peso del volumen (ton/ha) por muestra	Peso del volumen de suelo (ton/ha)	Carbono por estrato (ton/ha)	Carbono (ton/ha) por muestra	Carbono (ton/ha)			
A	A1	0-10	0,1	320,50	138,50	137,44	1,01	1,04	1,16281044	2,05	1007,71	1043,121847	1162,81044	118,91	77,5328693	82,7532869			
	A1	10-20	0,1	298,30	102,40	137,44	0,75			1,11	745,05			64,39					
	A1	20-30	0,1	331,40	189,20	137,44	1,38			0,85	1376,60			49,30					
A	A2	0-10	0,1	364,80	250,20	137,44	1,82	1,28		2,12	1820,43	1282,49903	1162,81044	122,97	87,97370456		82,7532869		
	A2	10-20	0,1	239,50	47,40	137,44	0,34			1,57	344,88			91,07					
	A2	20-30	0,1	363,40	231,20	137,44	1,68			0,86	1682,19			49,88					
B	B1	0-10	0,1	318,20	178,40	137,44	1,30	1,37		1,13564707	3,22	1298,02	1372,962747	1135,64707	186,77			102,0881671	106,631864
	B1	10-20	0,1	311,70	145,40	137,44	1,06				1,08	1057,92			62,65				
	B1	20-30	0,1	376,60	242,30	137,44	1,76				0,98	1762,95			56,84				
B	B2	0-10	0,1	288,50	108,20	137,44	0,79	0,90	3,14		787,25	898,3313931	1135,64707	182,13	111,1755607	106,631864			
	B2	10-20	0,1	315,15	186,10	137,44	1,35		1,63		1354,05			94,55					
	B2	20-30	0,1	241,50	76,10	137,44	0,55		0,98		553,70			56,84					
C	C1	0-10	0,1	288,30	146,20	137,44	1,06	1,33	1,10860497		2,18	1063,74	1332,217695	1108,60497	126,45		85,46017015	97,9311678	
	C1	10-20	0,1	336,50	201,40	137,44	1,47				1,25	1465,37			72,51				
	C1	20-30	0,1	320,10	201,70	137,44	1,47				0,99	1467,55			57,42				
C	C2	0-10	0,1	287,20	147,60	137,44	1,07	0,88		3,02	1073,92	884,992239	1108,60497	175,17	110,4021655		97,9311678		
	C2	10-20	0,1	269,30	92,20	137,44	0,67			2,14	670,84			124,13					
	C2	20-30	0,1	275,40	125,10	137,44	0,91			0,55	910,22			31,90					
D	D1	0-10	0,1	265,10	66,45	137,44	0,48	0,85		0,93574166	2,24	483,48	853,2207994	935,741657	129,93	83,72003094			104,408353
	D1	10-20	0,1	340,40	154,10	137,44	1,12				0,99	1121,22			57,42				
	D1	20-30	0,1	273,10	131,25	137,44	0,95				1,10	954,96			63,81				
D	D2	0-10	0,1	296,20	177,25	137,44	1,29	1,02	3,02		1289,65	1018,262515	935,741657	175,17	125,0966744	104,408353			
	D2	10-20	0,1	338,70	142,40	137,44	1,04		2,58		1036,09			149,65					
	D2	20-30	0,1	243,80	100,20	137,44	0,73		0,87		729,05			50,46					

TRANS	COD	PROF (cm)	Ps (m)	Pfresco suelo	Pseco suelo	VC	DA (g/cc) por estrato	DA (g/cc) por muestra	DA (g/cc)	M.O. (%)	Peso del volumen de suelo (t/ha) por estrato	Peso del volumen (ton/ha) por muestra	Peso del volumen de suelo (ton/ha)	Carbono por estrato (ton/ha)	Carbono (ton/ha) por muestra	Carbono (ton/ha)			
E	E1	0-10	0,1	310,50	130,60	137,44	0,95	1,12	1,1848928	2,38	950,23	1123,884362	1184,8928	138,05	102,6682135	110,49884			
	E1	10-20	0,1	299,50	162,40	137,44	1,18			1,98	1181,61			114,85					
	E1	20-30	0,1	335,60	170,40	137,44	1,24			0,95	1239,81			55,10					
E	E2	0-10	0,1	300,40	135,40	137,44	0,99	1,25		3,20	985,16	1245,901242		185,61	118,3294664				
	E2	10-20	0,1	320,80	180,16	137,44	1,31			1,85	1310,83			107,31					
	E2	20-30	0,1	372,40	198,15	137,44	1,44			1,07	1441,72			62,06					
F	F1	0-10	0,1	218,50	108,50	137,44	0,79	0,94		0,90227251	1,89	789,44		941,7442763	902,272507		109,63	76,75947409	79,7563805
	F1	10-20	0,1	238,40	130,50	137,44	0,95				1,20	949,51					69,61		
	F1	20-30	0,1	320,80	149,30	137,44	1,09				0,88	1086,29					51,04		
F	F2	0-10	0,1	219,40	115,20	137,44	0,84	0,86	2,15		838,18	862,8007373	124,71	82,75328693					
	F2	10-20	0,1	230,60	108,15	137,44	0,79		1,28		786,89		74,25						
	F2	20-30	0,1	248,50	132,40	137,44	0,96		0,85		963,33		49,30						
G	G1	0-10	0,1	310,50	192,60	137,44	1,40	1,35	1,26293898		2,85	1401,34	1348,95227	1262,93898		165,31	96,67440062	102,764888	
	G1	10-20	0,1	350,60	176,20	137,44	1,28				1,40	1282,01				81,21			
	G1	20-30	0,1	361,40	187,40	137,44	1,36				0,75	1363,50				43,50			
G	G2	0-10	0,1	310,20	136,15	137,44	0,99	1,18		2,98	990,61	1176,925689	172,85		108,8553751				
	G2	10-20	0,1	340,40	158,60	137,44	1,15			1,68	1153,96		97,45						
	G2	20-30	0,1	335,40	190,52	137,44	1,39			0,97	1386,20		56,26						
H	H1	0-10	0,1	340,50	136,20	137,44	0,99	1,22		1,23872235	2,79	990,98	1218,22856		1238,72235	161,83	106,3418407		120,16628
	H1	10-20	0,1	355,60	178,60	137,44	1,30				1,86	1299,48				107,89			
	H1	20-30	0,1	360,70	187,50	137,44	1,36				0,85	1364,23				49,30			
H	H2	0-10	0,1	304,50	136,20	137,44	0,99	1,26	3,55		990,98	1259,216143	205,92	133,9907193					
	H2	10-20	0,1	348,40	176,30	137,44	1,28		2,12		1282,74		122,97						
	H2	20-30	0,1	378,50	206,70	137,44	1,50		1,26		1503,93		73,09						

Tabla 17. Características de la temperatura, humedad relativa y luminosidad en la parcela de café en Río Azul

Transecto	Puntos	Dentro de la parcela			Fuera de la parcela			Dentro de la parcela			Fuera de la parcela		
		T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad
A	P1	23,1	76	223x10x100	23,6	74	617x10x100	23,22	74,00	188,33x10x100	24,25	71,67	716,67x10x100
	P2	24,2	74	62x10x100	24,7	72	715x10x100						
	P3	22,9	74	277x10x100	23,8	71	610x10x100						
	P4	23,5	73	143x10x100	24,7	70	920x10x100						
	P5	23,1	73	242x10x100	24,9	71	578x10x100						
	P6	22,5	74	183x10x100	23,8	72	860x10x100						
B	P1	22,1	73,2	176x10x100	24,3	73,2	610x10x100	21,42	74,58	185,67x10x100	23,13	73,32	686,83x10x100
	P2	21,9	74,5	158x10x100	23,7	72	575x10x100						
	P3	21,7	74,7	293x10x100	23,4	72,2	710x10x100						
	P4	20,9	75,6	186x10x100	22,8	74,5	785x10x100						
	P5	20,7	74,5	158x10x100	22,5	74,2	695x10x100						
	P6	21,2	75	143x10x100	22,1	73,8	746x10x100						
C	P1	21,1	77	232x10x100	23,5	68	295x10x100	21,78	72,50	118,67x10x100	22,87	67,25	375,5x10x100
	P2	21,2	76	115x10x100	22,4	67	317x10x100						
	P3	21,6	70	95x10x100	22,6	67	343x10x100						
	P4	22,9	72	123x10x100	23,1	66,5	368x10x100						
	P5	22,5	71	82x10x100	22,9	67	410x10x100						
	P6	21,4	69	65x10x100	22,7	68	520x10x100						
D	P1	23,1	77	107x10x100	22,4	67	348x10x100	22,15	77,00	168,67x10x100	22,32	65,33	465,33x10x100
	P2	22,6	77,5	135x10x100	22,2	67	440x10x100						
	P3	21,8	77	210x10x100	22,5	65	560x10x100						
	P4	21,5	77,5	158x10x100	21,8	64	485x10x100						
	P5	22,4	76	132x10x100	22,3	65	399x10x100						
	P6	21,5	77	270x10x100	22,7	64	560x10x100						
E	P1	22,8	75	218x10x100	24,1	71	598x10x100	21,95	75,08	18,5x10x100	24,47	69,50	666,5x10x100

Transecto	Puntos	Dentro de la parcela			Fuera de la parcela			Dentro de la parcela			Fuera de la parcela		
		T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad	T°	H R°	Luminosidad
	P2	22,5	75	120x10x100	24,7	68	650x10x100						
	P3	20,1	78	245x10x100	23,5	70	605x10x100						
	P4	20,5	75	133x10x100	24,5	69	840x10x100						
	P5	23,5	74	225x10x100	25,2	71	496x10x100						
	P6	22,3	73,5	172x10x100	24,8	68	810x10x100						
F	P1	22,1	73	182x10x100	23,4	70	584x10x100	21,10	74,97	200,17x10x100	23,52	71,27	643,17x10x100
	P2	20,7	76,8	168x10x100	23,5	71	521x10x100						
	P3	21,4	75,2	322x10x100	24,6	70,4	682x10x100						
	P4	20,5	74,8	192x10x100	23,5	72,5	685x10x100						
	P5	20,5	74,8	175x10x100	22,6	71,2	586x10x100						
	P6	21,4	75,2	162x10x100	23,5	72,5	801x10x100						
G	P1	23,5	76,7	258x10x100	24,8	69	355x10x100	22,82	73,68	163,17x10x100	24,15	67,32	432,83x10x100
	P2	22,8	75,8	169x10x100	25,1	66	337x10x100						
	P3	21,5	70,8	145x10x100	23,2	68,5	358x10x100						
	P4	22,7	72,6	188x10x100	23,5	64,7	392x10x100						
	P5	23,8	73,2	98x10x100	23,5	67,5	534x10x100						
	P6	22,6	73	121x10x100	24,8	68,2	621x10x100						
H	P1	23,8	77,2	135x10x100	25,4	68	453x10x100	21,47	76,40	165x10x100	23,05	67,40	487,33x10x100
	P2	21,6	78,2	169x10x100	23,2	69,5	567x10x100						
	P3	20,5	76	84x10x100	22,5	68,2	472x10x100						
	P4	20,8	78	175x10x100	22,4	67,2	465x10x100						
	P5	21,9	75	145x10x100	22,6	65,5	405x10x100						
	P6	20,2	74	282x10x100	22,2	66	562x10x100						

Anexo 2. Panel fotográfico

Figura 17. Evaluación de la circunferencia de la planta de café.



Figura 18. Cuadrantes de 1m x 1m para medición del carbono en material herbáceo, arbustivo y raíces.



Figura 19. Cuadrantes de 0.5m x 0.5m para la medición de la biomasa y carbono en la hojarasca.



Figura 20. Muestras de suelo para determinar la densidad aparente del suelo.



Figura 21. Árboles forestales del transecto y sistema agroforestal del café.



Figura 22. Toma de datos con el Luxómetro.



Figura 23. Toma de las coordenadas UTM de la parcela.



Figura 24. Toma de datos con el Higrómetro.



Figura 25. Evaluación de peso seco de las muestras.



Figura 26. Determinación del color de suelo de la parcela.



Figura 27. Muestras de suelo determinación de M. O.