



Universidad
Nacional
de Loja

FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

EVALUACIÓN DE CARBONO EN HOJARASCA Y SUELO EN
SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFETO (*Coffea arábica L*)
CON PINO (*Pinus patula*) Y ALISO (*Alnus acuminata*) EN EL
CANTÓN LOJA.

TESIS DE GRADO PREVIO A
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERA AGRÓNOMA.

Autora: Daniela Cecibel Farez Armijos

Directora: Ing. Paulina Fernández Mg. Sc.

Loja–Ecuador

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
FACULTAD AGROPECURIA Y RECURSOS NATURALES RENOVABLES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Ing. Paulina Fernández Guarnizo, Mg. Sc

CERTIFICA

En calidad de Directora de la tesis titulada: **Evaluación de carbono en hojarasca y suelo en Sistemas Agroforestales de cafeto (*Coffea arábica* L) con pino (*Pínus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*) en el cantón Loja**, de autoría de la Srta. egresada de la Carrera de Ingeniería Agronómica Daniela Cecibel Farez Armijos, portadora de la cedula 1105228348 ha sido dirigida, revisada y culmina dentro del cronograma aprobado en su integridad; por tal razón autorizo su presentación y publicación.

Loja, 24 de junio del 2019

Atentamente,

.....
Ing. Paulina Fernández Guarnizo

DIRECTORA DE TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
FACULTAD AGROPECURIA Y RECURSOS NATURALES RENOVABLES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

CERTIFICACIÓN:

En calidad de presidente del Tribunal de Calificación de la tesis titulada “**Evaluación de carbono en hojarasca y suelo en Sistemas Agroforestales de cafeto (*Coffea arábica* L) con pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*) en el cantón Loja**” de autoría de la Srta. egresada de la Carrera de Ingeniería Agronómica **Daniela Cecibel Farez Armijos** portadora de la cédula N° 1105228348 se informa que la misma ha sido revisada e incorporadas todas las observaciones realizadas por el Tribunal Calificador, y luego de su revisión se ha procedido a la respectiva calificación. Por lo tanto autorizo la versión final de la tesis y la entrega oficial para la sustentación pública.

Loja, 16 de julio del 2019

Atentamente,

.....
PhD. Max Enrique Encalada Córdova
PRESIDENTE

.....
Mg. Sc. Nohemí del Carmen Jumbo
VOCAL

.....
Ing. Klever Aníbal Chamba
VOCAL

AUTORÍA

Yo, Daniela Cecibel Farez Armijos, declaro ser la autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional- Biblioteca Virtual.

Autora: Daniela Cecibel Farez Armijos

Firma:

Cédula: 1105228348

Fecha: 18 de julio del 2019

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA PARA LA
CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, Daniela Cecibel Farez Armijos, declaro ser la autora de la tesis titulada: “**Evaluación de carbono en hojarasca y suelo en Sistemas Agroforestales de cafeto (*Coffea arabica* L.) con pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*) en el cantón Loja**”, como requisito para optar al grado de: Ingeniera Agrónoma, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Digital Institucional en las redes de información del país y del exterior con los cuales tenga convenio la universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los 18 días del mes de julio del 2019, firma la autora.

Firma:

Autora: Daniela Cecibel Farez Armijos

Número de cédula: 1105228348

Dirección: Ruiz Señores, El Paraíso, Loja

Correo electrónico: danielafarez14@gmail.com

Celular: 0985316725

Directora de Tesis: Ing. Paulina Fernández Guarnizo Mg. Sc

Tribunal de Grado: Dr. Max Encalada Córdova

Ing. Nohemí del Carmen Jumbo Benítez, Mg. Sc

Ing. Klever Aníbal Chamba

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios y a San José por todas sus bendiciones, por guiarme a lo largo de mi vida, siendo el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

A la Universidad Nacional de Loja, a la Carrera de Ingeniería Agronómica, a sus docentes por haber sido participes con sus conocimientos en mi formación profesional.

Agradezco a mi directora de tesis Ing. Paulina Fernández quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación. Al Dr. Max Encalada, la Ing. Nohemí Jumbo y al Ing. Klever Chamba por sus consejos, enseñanzas y apoyo en este trabajo.

A mis padres Ángel y Elena por confiar y creer en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado. A mis hermanos y sobrina Diana, Cristian y Pamela por haberme brindado su dedicación y paciencia siendo también mi apoyo fundamental para lograr los objetivos propuestos a ustedes que siempre tuvieron fe en mí.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos Cristina y Junior quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta y a ti Alex que con tu apoyo moral pude permanecer con empeño y dedicación en la culminación de este trabajo.

“Mil gracias a todos”

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A San José quien con su bendición llena siempre mi vida, a toda mi familia por estar siempre presentes. Especialmente con mucho amor a mis padres Ángel y Elena quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, valentía y de no temer a las adversidades.

Para ti papito que con mucho amor estuviste conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, quien me enseñó que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por sí mismo.

Daniela Cecibel Farez Armijos

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Páginas
CERTIFICACIÓN.....	ii
APROBACIÓN.....	iii
AUTORÍA.....	iv
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
RESUMEN.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Sistema Agroforestal Café.....	3
2.2. Interacciones Sistema Agroforestal Café.....	3
2.3. Características generales de los componentes del SAF Café.....	4
2.3.1. Pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.).....	4
2.3.2. Aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.).....	5
2.4. Cambio climático global y gases de efecto invernadero (GEI).....	5
2.5. Sistemas agroforestales como sumideros de carbono.....	6
2.6. El carbono en ecosistemas forestales.....	6
2.7. Almacenamiento de carbono en hojarasca y suelo.....	7
2.7.1. Carbono en hojarasca.....	7
2.7.2. Carbono en el suelo.....	8
2.8. Ciclo del carbono.....	9
2.8.1. Almacenamiento de carbono.....	9
2.8.2. Carbono fijado.....	9

2.8.3. Reservorio de carbono.....	10
2.8.4. Secuestro de carbono.....	10
2.8.5. Sumidero.	11
2.9. Estudios similares realizados en el almacenamiento y cuantificación de carbono en sistemas agroforestales.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Materiales.....	13
3.1.1. Materiales de campo.	13
3.1.2. Materiales de laboratorio.....	13
3.2. Metodología.....	13
3.2.1. Localización del área de estudio.	13
3.2.2. Ubicación geográfica.	14
3.2.3. Condiciones climáticas.....	14
3.3. Determinación de los componentes en cada uno de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.) en tres parcelas temporales en la “Hacienda Cristal”.....	14
3.3.1. Selección del área de estudio.	14
3.3.2. Establecimiento de las parcelas temporales estudiadas en cada uno de los SAFs de café.....	15
3.3.3. Metodología para el primer objetivo.....	16
3.3.4. Metodología para el segundo objetivo.	17
3.3.5. Carbono total almacenado.....	18
3.4. Análisis estadístico.....	18
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Cuantificación del almacenamiento de carbono en el estrato herbáceo, hojarasca y suelo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.).....	19

4.1.1. Cuantificación del contenido de carbono en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).....	19
4.1.2. Cuantificación del contenido de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	20
4.2. Almacenamiento del contenido de carbono en el suelo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	21
4.2.1. Cuantificación total fijado en tres componentes (estrato herbáceo, hojarasca y suelo) de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.) y pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.).....	22
5. DISCUSIÓN	26
5.1. Cuantificación del contenido de carbono en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).....	26
5.2. Cuantificación del contenido de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	27
5.3. Almacenamiento del contenido de carbono en el suelo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth).	28
5.4. Carbono total fijado en tres componentes (estrato herbáceo, hojarasca y suelo) de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.).....	30
6. CONCLUSIONES	32
7. RECOMENDACIONES.....	33
8. BIBLIOGRAFÍA	34
9. ANEXOS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Páginas
Figura 1. Interacción SAFs café (Farfán, 2014).	4
Figura 2. Mapa de la ubicación del área de estudio Hacienda Cristal	13
Figura 3. Diseño de las parcelas temporales en cada SAFs de cafeto	15

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Páginas
Cuadro 1. Datos climáticos del parque universitario “Francisco Vivar Castro”.	14
Cuadro 2. Valores medios del contenido de carbono ($t/C/ha^{-1}$) fijado en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.) y pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.), en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.	19
Cuadro 3. Valores medios del contenido de carbono ($t/C/ha^{-1}$) fijado en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.) y pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.), en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.	20
Cuadro 4. Valores medios del contenido de carbono $t/C/ha^{-1}$ fijado en el suelo a tres profundidades en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso, en la Hacienda Cristal, enero 2019.	21
Cuadro 5. Valores medios del contenido de carbono $t/C/ha^{-1}$ fijado en el suelo a tres profundidades en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino, en la Hacienda Cristal, enero 2019.	22
Cuadro 6. Valores medios de carbono fijado $t/C/ha^{-1}$, correspondiente a los componentes herbáceo, hojarasca y suelo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino, en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.	23
Cuadro 7. Análisis del coeficiente de correlación entre las variables carbono estrato herbáceo, hojarasca y suelo en los SAFs de cafeto con asocio arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.).	24
Cuadro 8. Regresión lineal entre el carbono del componente herbáceo, hojarasca y suelo en cada uno de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (<i>Alnus acuminata</i> Kunth.).	25

ÍNDICE DE ANEXOS

Contenido	Páginas
Anexo 1. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ del estrato herbáceo del sistema agroforestal cafeto con asocio arbóreo de aliso	41
Anexo 2. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ del estrato herbáceo del sistema agroforestal cafeto con asocio arbóreo de pino.....	42
Anexo 3. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ de la hojarasca del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso.....	43
Anexo 4. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ de la hojarasca del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino.	45
Anexo 5. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $P_{ss} = D_a * P_m * 10\ 000\ m^2$ del suelo del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino.....	47
Anexo 6. Análisis estadístico obtenidos del programa estadístico statgraphics centurion tanto del anova como la comparacion multiple de Tukey.....	48
Anexo 7. Análisis estadístico prueba de múltiples rangos obtenida del programa estadístico statgraphics centurion.....	48
Anexo 8. Fotografías del área de estudio en cada uno de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino y aliso.....	49
Anexo 9. Folleto informativo de resultados obtenidos en la Hacienda Cristal.....	50
Anexo 10. Registro de asistencia a la socialización de resultados.	51

**EVALUACIÓN DE CARBONO EN HOJARASCA Y SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE CAFETO (*Coffea arábica* L.) CON PINO (*Pinus patula*) Y
ALISO (*Alnus acuminata*) EN EL CANTÓN LOJA**

RESUMEN

La investigación realizada permitió evaluar el carbono existente en el estrato herbáceo, hojarasca y suelo en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) con asoció arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) respectivamente. El estudio se realizó en la hacienda Cristal, ubicada entre el barrio Tres Leguas y Pueblo Nuevo de la parroquia San Sebastián del cantón y provincia de Loja, a partir de octubre del 2018 a mayo de 2019. Se establecieron 3 parcelas temporales con las siguientes particularidades: en el sistema agroforestal con asoció arbóreo de pino se estableció parcelas de 10 x 10 m (100 m²) y en el sistema agroforestal con asoció arbóreo de aliso de 20 x 20 m (400 m²) a 20 cm de distancia del fuste del árbol; en cada parcela se colocaron 3 trampas temporales de 2 x 2 m (4 m²) para realizar el muestreo del estratos herbáceo y hojarasca; en lo referente al suelo se definió cuadrantes de 0,25 x 0,25 m² dentro de las trampas temporales para la toma de muestras a profundidades entre: 0-10, 10-20 y 20-40 cm.

Para determinar el contenido de carbono del estrato herbáceo y hojarasca se cortó, pesó y etiquetó *in situ* toda la vegetación existente de cada trampa y se recolectó toda la hojarasca, posteriormente fue llevada al laboratorio para obtener la relación peso seco/peso húmedo equivalente a biomasa, para obtener el carbono se multiplicó la biomasa obtenida por el factor de conversión de 0,5. Para evaluar el carbono orgánico en el suelo se tomaron muestras de 500 gr, correctamente identificadas, las que fueron llevadas al laboratorio para obtener: densidad aparente, porcentaje de materia orgánica y porcentaje de carbono, con estos resultados se determinó el carbono orgánico por t/ha. Los resultados obtenidos fueron procesados mediante análisis de varianza ANOVA obtenidos del programa estadístico statgraphics centurion, para efecto de comparación se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

En el sistema agroforestal café con asoció arbóreo de pino, se registró un total de 30,51 t/C/ha⁻¹ distribuido en el estrato herbáceo 0,0044 t/C/ha⁻¹, en la hojarasca 0,0415 t/C/ha⁻¹ y en el suelo 30,46 t/C/h⁻¹. Respecto al sistema agroforestal café con asoció arbóreo aliso se registró un total de 60,56 t/C/ha⁻¹, distribuido en el estrato herbáceo 0,0114 t/C/ha⁻¹, en la hojarasca 0,0499 t/C/ha⁻¹ y en el suelo 60,50 t/C/ha⁻¹, siendo este sistema agroforestal de café el que acumuló mayor contenido de carbono total a diferencia del sistema agroforestal de café con asoció arbóreo de pino. La cantidad de carbono en los diferentes sistemas y estratos difiere esta variabilidad ya que depende de varios factores que determinan una mayor o menor acumulación de este elemento.

ABSTRACT

The research carried out allowed to evaluate the existing carbon in the herbaceous layer, litterfall and soil in agroforestry coffee systems (*Coffea arabica* L.) with associated pine trees (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) and alder (*Alnus acuminata* Kunth.) respectively. The study was carried out in the hacienda Cristal, located between the neighborhood Tres leguas and Pueblo Nuevo of the parish of San Sebastián of the canton and province of Loja, from October 2018 to May 2019. Three temporary plots were established with the following particularities: in the agroforestry system with a pine tree association plots of 10 x 10 m (100 m²) and in the agroforestry system with an alder tree association of 20 x 20 m were established (400 m²) at 20 cm distance from the stem of the tree; on each plot 3 temporary traps of 2 x 2 m (4 m²) were placed for sampling of the herbaceous and litterfall strata; for the soil quadrants of were defined, 25 x 0,25 m² inside temporary traps for sampling at depths between: 0-10, 10-20 and 20-40 cm.

In order to determine the carbon content of the herbaceous and litterfall stratum, all existing vegetation from each trap was cut, weighed and labelled on the spot and all litterfall was collected, was then taken to the laboratory to obtain the ratio dry weight/wet weight equivalent to biomass, to obtain the carbon multiplied the biomass obtained by the conversion factor of 0,5. To evaluate the soil organic carbon samples were taken of 500 gr, correctly identified, which were taken to the laboratory to obtain: apparent density, percentage of organic matter and percentage of carbon, with these results the organic carbon per t/ha was determined. The obtained results were processed by ANOVA variance analysis obtained from the statistical program Statgraphics centurion, for comparison the Tukey test was used ($\alpha = 0,05$).

In the coffee agroforestry system with pine tree association a total of 30,51 t/C/ha⁻¹ was recorded distributed in the 0,0044 t/C/ha⁻¹ herbaceous stratum, 0,0415 t/C/ha⁻¹ litterrestrial litter and 30,0044 t/C/h⁻¹. Concerning the agroforestry of coffee system with arboreal alder, a total of 60,56 t/C/ha⁻¹ was recorded, distributed in the herbaceous stratum 0,0114 t/C/ha⁻¹, litterfall 0,0499 t/C/ha⁻¹ and soil 60,50 t/C/ha⁻¹, being this agroforestry of coffee system that accumulated the highest total carbon content unlike the agroforestry of coffee system with pine tree association. The amount of carbon in different systems and strata differs this variability as it depends on several factors that determine a greater or lesser accumulation of this element.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura comercial provoca el 70 % de la deforestación en América Latina, el pastoreo extensivo, el cultivo de soja y las plantaciones de palma aceitera han sido los principales factores de la deforestación desde 1990 (FAO, 2016). Una de las consecuencias de la deforestación es el calentamiento global, causado por el aumento en las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), en especial la presencia del dióxido de Carbono (CO₂) (IPCC, 2014).

En la actualidad se demanda la implementación de actividades productivas que sean amigables con el ambiente y que permitan la sostenibilidad de los ecosistemas, es así que los Sistemas Agroforestales (SAFs) son una alternativa para la producción y manejo eficiente de los recursos naturales.

Los sistemas agroforestales tienen una ventaja estratégica importante para la captación de C, debido al contenido potencial de este elemento en las múltiples especies de plantas que conviven simultáneamente en ellos (Mashuara *et al.*, 2015); por último el potencial de captura de carbono (C) en el sector agrícola y forestal sirve para mitigar los efectos del cambio climático (Poveda *et al.*, 2013). Los árboles en los SAF, contribuyen a recuperar la biodiversidad, siendo una alternativa para reducir la deforestación, combatir la erosión de suelos y rehabilitar praderas degradadas; representan una estrategia valiosa en la conservación de suelos y el mantenimiento de su fertilidad. Los SAF con altas densidades de especies arbóreas incrementa el potencial de fijación de carbono (Román *et al.*, 2016). Estos sistemas pueden mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos.

El SAF cafeto como sombra diversificada representan una alternativa para la captura de carbono, aportando a la mitigación del cambio climático a través del almacenamiento de este elemento en la misma planta de café, y en otras especies arbóreas de sombra que son parte de sistema y que son importantes reservas estables de carbono (Aguirre y Jiménez, 2011). Los sistemas agroforestales con café al conservar la cobertura arbórea se derivan en diversos beneficios ambientales, además de abrigar amplia diversidad biológica (Aguirre *et al.*, 2016). Vega *et al.* (2014) menciona que la incorporación de árboles a sistemas de producción con café es una estrategia para la generación de servicios eco-sistémicos en el marco de mecanismos de desarrollo limpio.

En la región sur del Ecuador los sistemas agroforestales cafeto han sido y son una forma de producción de pequeños productores que representan el pilar fundamental de la economía campesina, siendo los sistemas agroforestales un ecosistemas sustentable a nivel social, económico y ambiental; por el empleo limitado de insumos agrícolas. Por tanto, es fundamental ejecutar e implementar investigaciones relacionadas a los beneficios ambientales que brinda este sistema, especialmente en la cantidad de carbono que almacena los SAF cafeto.

En este contexto, para documentar el contenido de carbono presente en la hojarasca y suelos de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino y aliso respectivamente, se realizó esta investigación en la Hacienda Cristal con la finalidad de generar información en cuanto a la acumulación de carbono en tres parcelas instaladas temporalmente en cada sistema agroforestal. Esta investigación forma parte del proyecto denominado: “Efecto de la sombra y la densidad poblacional en el desarrollo del cafeto (*Coffea arabica* L.) en sistemas agroforestales en la provincia de Loja”, ejecutada por la Universidad Nacional de Loja; se plantearon los objetivos:

General.

- Evaluar el almacenamiento de carbono en la hojarasca y suelo en dos sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbórea de pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*) y comparar sus resultados con otras investigaciones similares realizadas.

Específicos.

- Cuantificar el almacenamiento de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbórea de pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*).
- Determinar el contenido de carbono almacenado en el suelo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistema Agroforestal Café

En los sistemas agroforestales interactúan elementos de la agricultura con elementos forestales que se traducen en sistemas de producción sostenibles en la misma unidad de terreno (Durán, 2004).

Según Farfán (2014), los SAFs con café, pueden clasificarse como simultáneos, en los cuales los componentes agrícolas y arbóreos se encuentran en el mismo terreno durante toda la duración del sistema.

En el sistema agroforestal, se pueden encontrar algunos árboles de sombra naturales del bosque que incluyen frutales como mango *Mangífera indica*, aguacate *Persea americana*, guayaba *Psidium guajava*, naranja *Citrus reticula* así como árboles maderables como por ejemplo *Cedrela odorata* (cedro) (Duguma *et al.*, 2000).

El café es cultivado bajo diversos sistemas de producción, resultado de factores socioeconómicos y biofísicos, que comprenden desde los sistemas tradicionales bajo sombra diversificada a los sistemas modernos de monocultivo y/o bajo sombra especializada (Donald 2004, Somarriba *et al.*, 2004).

2.2. Interacciones Sistema Agroforestal Café

Los SAFs presentan una tradición e innovación productiva y de conservación de la naturaleza, desarrollada fundamentalmente por culturas agroforestales en tierras tropicales donde existen formas de manejo y aprovechamiento de sistemas agroforestales en fincas y territorios comunitarios para obtener: (i) Una producción biodiversa; (ii) Una producción libre de agroquímicos; (iii) Una producción duradera con predominio y desarrollo de saberes tradicionales y novedosos; (iv) Una producción con fortalecimiento de la identidad cultural; (v) Diversificación del paisaje; (vi) Interacciones ecológicas totales de complementariedad del sistema (Farfán, 2014).

Damatta y Rodríguez (2007) citan entre las principales interacciones positivas en cafetales arborizados, las siguientes:

Aspectos bióticos: Reducción de la incidencia de *Cercospora coffeicola*, del minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) y de arvenses, especialmente gramíneas. Aspectos endógenos: Atenuación del ciclo bienal de la producción de café, disminuyendo el estímulo a la superproducción que, a su vez, reduce el agotamiento de la planta y el secamiento de las yemas apicales y, en última instancia, hace el cultivo más perdurable.

Además, el tamaño de los frutos producidos es mayor, si bien el incremento en la calidad de la bebida es asunto de controversia. Así mismo, hay un alargamiento del período de maduración del fruto que permite mayor flexibilidad en la cosecha. Aspectos económicos: Ganancias adicionales derivadas de la explotación de la especie usada para la arborización (madera, frutos, látex, entre otros).

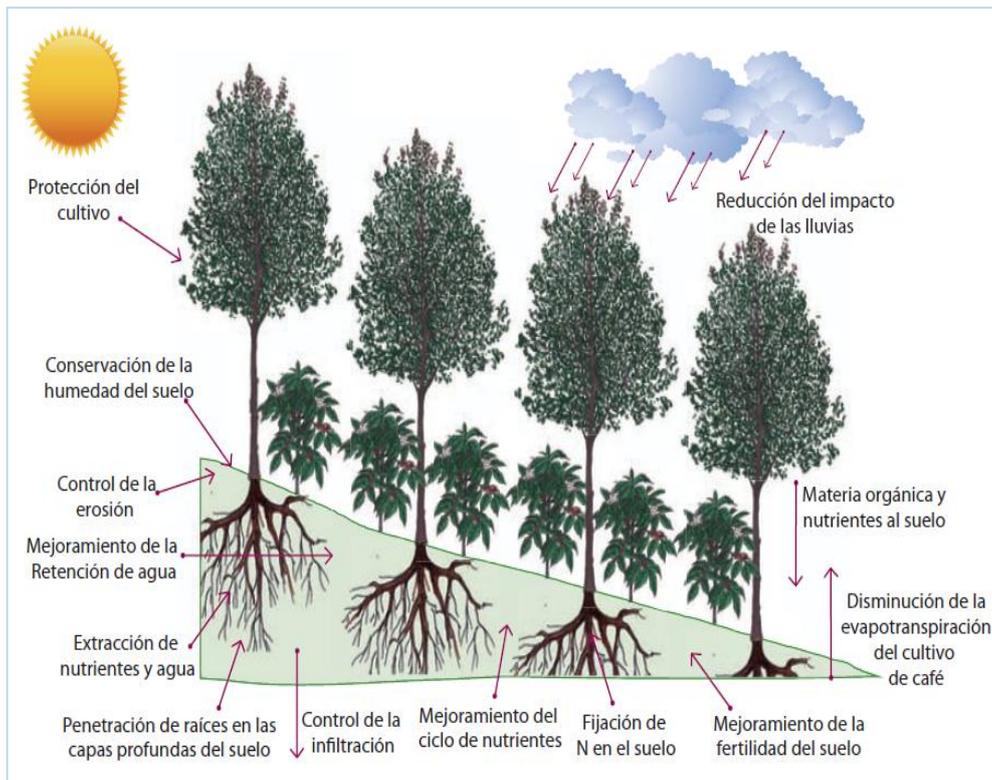


Figura 1. Interacción SAFs café (Farfán, 2014).

2.3. Características generales de los componentes del SAF Café

2.3.1. Pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.).

Es un género de plantas vasculares pertenecientes al grupo de las coníferas y, dentro de éste, a la familia de las pináceas. Es uno de los más importantes géneros, desde el punto de vista forestal, tanto por la cantidad de especies como por el valor que tienen muchas de ellas, tanto

en sus países de origen como también introducidas. Los pinos son nativos del Hemisferio Norte, con sólo una especie encontrada al sur del Ecuador (Mesa, 2016).

Suelen ser árboles de gran talla y monoicos, las hojas son estrechas y en forma de acícula. Las piñas están maduras a los dos o tres años, según las especies (Ibáñez, 2014).

2.3.2. Aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

El aliso es una especie ampliamente distribuida en América, principalmente, en zonas de media y alta montaña, desde México hasta el norte de Argentina. Se desarrolla preferiblemente en suelos de origen volcánico, tanto en zonas de alta pendiente como en planicies (Cénicafe, 2005).

Alnus acuminata es un árbol de la familia de las betuláceas. Es una especie de vida media, de tamaño variable con alturas hasta de 30 m y diámetro de 50 cm; excepcionalmente puede alcanzar hasta 40 m de altura y 60 cm de diámetro. Tiene fuste recto, y es cónico cuando crece sin competencia. La copa es irregular y generalmente es angosta. Las hojas son simples, alternas, acuminadas, de forma elíptica u ovoide de 8 a 15 cm de largo por 3 a 6 cm de ancho (Cénicafe, 2005).

2.4. Cambio climático global y gases de efecto invernadero (GEI)

El cambio climático es la variación del clima mundial de la tierra que pueden ser causados tanto por fuerzas naturales como por actividades humanas (ACICAFOC, 2009). El efecto invernadero es un fenómeno natural por el cual la Tierra experimenta un calentamiento de su atmósfera, debido a que algunos gases permiten que la radiación solar pase a través de la atmósfera y caliente la superficie terrestre evitando que la radiación que refleja la Tierra se escape al espacio (Useros, 2012).

El principal gas de invernadero generado por las actividades humanas es el dióxido de carbono, este gas representa el 75 % aproximadamente del total de «emisiones de gases de efecto invernadero» en el mundo, es decir, de todos los gases de efecto invernadero que se vierten a la atmósfera son de vapores y humos procedentes de tubos de escape, chimeneas, incendios y otras fuentes. El dióxido de carbono se libera principalmente al quemar combustibles fósiles tales como el carbón, el petróleo o el gas natural (Concha *et al.*, 2007).

El dióxido de carbono es el GEI más importante y el mayor contribuyente al calentamiento atmosférico. Su emisión se ha incrementado entre 1970 y 2004 en un 80 %, pasando de 21 a

30 t (Toneladas), representando el 77 % de todas las emisiones de GEI. Lo más preocupante es que mientras en el periodo 1970-1994 las emisiones de CO₂ equivalente se incrementaron a un ritmo de .43 t por año, en la década 1995-2004 ese incremento alcanzó las .92 t anuales (Useros, 2012).

2.5. Sistemas agroforestales como sumideros de carbono

La capacidad de secuestrar Carbono de cualquier ecosistema terrestre depende principalmente de dos componentes: el área total de esos ecosistemas y el número de árboles por unidad de área. Los SAF pueden contener sumideros considerablemente grandes de Carbono y en algunos casos se asemejan a los encontrados en bosques secundarios. Asimismo, la cantidad de Carbono acumulada en el suelo aumenta en los sistemas agroforestales (Roig *et al.*, 2010).

Los sistemas agroforestales pueden ser manejados para estabilizar la emisión de gases en tres maneras: 1) por el secuestro de CO₂ en las plantas y captura de Carbono y nitrógeno en la vegetación perenne y suelo a largo plazo, 2) por la producción de alimentos y fibra, lo cual ayuda a reducir la deforestación y degradación de las tierras y 3) por la producción sostenida de leña, lo cual puede contribuir en la reducción del uso de combustible fósil (Dixon *et al.*, 2009).

En los sistemas agroforestales, el secuestro de carbono es un proceso dinámico y se puede dividir en fases: cuando se establecen muchos sistemas probablemente son fuentes de 12 gases de efecto invernadero (pérdida de carbono y nitrógeno de la vegetación y del suelo). Luego sigue una fase rápida de acumulación y período de maduración cuando el carbono es almacenado en los troncos, raíces y en el suelo y al final del periodo de rotación, cuando los árboles son cosechados y en la tierra se vuelve a cultivar (sistemas secuenciales), parte del carbono será lanzado de nuevo a la atmósfera. Por lo tanto, un secuestro efectivo de carbono solo puede ser considerado si hay un balance positivo después de varias décadas al compararlas con una reserva de carbono inicial (Albrecht y Kandji, 2003).

2.6. El carbono en ecosistemas forestales

El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO₂ participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la

copa) así como su altura y el grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno (Orellana *et al.*, 2012).

Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO₂ fluye para regresar al ciclo del carbono (INECC, 2007).

2.7. Almacenamiento de carbono en hojarasca y suelo

2.7.1. Carbono en hojarasca.

En el sistema agroforestal la hojarasca es la parte del ecosistema sobre el suelo que se acumula y descompone. La mayoría de los estudios sobre la descomposición y el ciclo de los nutrientes han sido conducidos en este ambiente específico. Esto se refleja en los tipos modales reconocidos en clasificaciones anteriores de los tipos de humus y por las distintas comunidades microbianas y de invertebrados que caracterizan a la hojarasca de diferente calidad (Lavelle y Spain, 2005).

La hojarasca se caracteriza por ser un residuo vegetal fresco, sin descomponer, y fácilmente reconocible (por especie y tipo) (FAO, 2004). Los elementos de más de 2 cm de diámetro se denominan como hojarasca gruesa, mientras que cualquier cosa más pequeña se conoce como mantillo fino o mantillo. El tipo de hojarasca es el más directamente afectado por el tipo de ecosistema. Por ejemplo, los tejidos de hojas representan aproximadamente el 70 % de la hojarasca en los bosques, pero los residuos leñosos tienden a aumentar con la edad del bosque (Lonsdale, 1988).

Por otro lado, en muchos enfoques conceptuales se distinguen tres formas de materia orgánica, que se conocen como, materia orgánica activa del suelo fácilmente descomponible (materia orgánica lábil), las sustancias húmicas más lentas y las sustancias húmicas pasivas, también a menudo llamada la fuente recalcitrante. Estas fuentes reciben materia orgánica fresca (caída de hojarasca) a través de la entrada de hojarasca, así como del retorno microbiano y otros eventos como los incendios. La hojarasca y las sustancias húmicas

resultantes son descompuestas, principalmente por la mayoría de los microorganismos que comprenden a las bacterias, hongos y la meso y macro-fauna del suelo, esa actividad microbiana da como resultado la respiración microbiana y posterior emanación de CO₂ del suelo y cambios en la composición química de la materia orgánica del suelo (MOS) (Kutsch *et al.*, 2009).

2.7.2. Carbono en el suelo.

La biosfera terrestre incluye el carbono orgánico en todos los organismos vivos de la tierra, al igual que el carbono almacenado en los suelos. Cerca de 500 t de carbono se almacenan en la superficie de las plantas y otros organismos vivos, mientras que el suelo tiene una capacidad aproximada de 1 500 t de carbono (Prentice, 2001). Carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos (incluye la turba) a una profundidad especificada por el país y aplicada de manera coherente en todas las series cronológicas (FAO, 2004).

La mayoría de carbono en la biosfera terrestre es el carbono orgánico, mientras que alrededor de un tercio del carbono del suelo se almacena en formas inorgánicas, tales como carbonato de calcio (Rattan, 2008). El suelo toma el color café por las grandes cantidades de carbono por la descomposición de las hojas y raíces, este es el que sostiene la mayor parte del carbono a diferencia de la atmósfera, según informes de Naciones Unidas (Hopkins, 2012).

Oades (1988) indica que varios factores favorecen la retención del carbono en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia. Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrientes, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de carbono en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrientes, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga. La magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de carbono depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura del carbono resistente como del carbono adquirido (FAO, 2000).

La concentración de carbono en el suelo se correlaciona con la densidad aparente (DA), la cual varía con la profundidad del suelo, manejo y otras propiedades físicas. Para calcular la materia orgánica del suelo y almacenaje de carbono, se considera el carbono como el producto de la concentración de COS, DA y el espesor del suelo. De este modo, las

comparaciones de carbono en el suelo son basadas en los mismos espesores o volúmenes (por ejemplo, 60 t C; 18 ha⁻¹ a 30 cm), por lo tanto, se sugiere expresar el carbono almacenado en términos de una masa equivalente de suelo por unidad de área (FAO, 2006).

2.8. Ciclo del carbono

El ciclo del Carbono comienza con la fijación del anhídrido carbónico (CO₂) atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis realizados por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera. Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta y el CO₂ así formado, se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales que también respiran y liberan CO₂. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo lo que da como resultados que el Carbono de sus tejidos se oxide en CO₂ y regrese a la atmósfera (Saugier y Pontauiller, 2006).

2.8.1. Almacenamiento de carbono.

La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) consiste en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía (Metz *et al.*, 2005). Es la cantidad de Carbono que se encuentra acumulada en un determinado ecosistema vegetal, tomando en cuenta criterios como tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que son datos de biomasa basados en volúmenes por hectárea de inventarios forestales (Arjona, 2016).

Dicha cantidad promedio de carbono por hectárea nunca será liberada a la atmósfera, en este caso, un pago por el servicio ambiental de almacenamiento se refiere a un solo pago por la conservación del bosque, evitando un cambio de uso de la tierra en forma permanente como lo son los parques nacionales o zonas de reserva absoluta (Ramírez *et al.*, 1994). El carbono almacenado se expresa en t C/ha.

2.8.2. Carbono fijado.

Se refiere al flujo de Carbono dentro de una unidad de área cubierta con vegetación en un lapso de tiempo dado. Su cuantificación permite predecir el comportamiento del C en cualquier momento durante el crecimiento de la población (Ortiz y Riascos, 2006).

La captura de carbono por medio de la fotosíntesis ocurre cuando las plantas absorben energía solar y CO₂ de la atmósfera, produciendo oxígeno e hidratos de carbono (azúcares como la glucosa), que sirven de base para su crecimiento. Por medio de este proceso las plantas fijan el carbono en la biomasa de la vegetación, y consecuentemente constituyen, junto con sus residuos (madera muerta y hojarasca), un stock natural de carbono. El proceso inverso ocurre con la emisión de carbono por medio de la respiración de las plantas, animales y por la descomposición orgánica (forma de respiración de las bacterias y hongos). A ésta se suman las emisiones de GEI debido a la deforestación, incendios, gases industriales y quema de combustibles: acciones antropogénicas que contribuyen con el desequilibrio del ciclo de carbono (Rügnitz *et al.*, 2009).

2.8.3. Reservorio de carbono.

Es cantidad de carbono contenido en un sistema que tiene la capacidad de acumular o liberar carbono. Estos pueden ser los océanos, suelo, y la vegetación. En el contexto de los bosques se refiere a la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas forestales especialmente en la biomasa y el suelo y en menor proporción en la madera muerta y hojarasca (FAO, 2011).

2.8.4. Secuestro de carbono.

El secuestro de carbono es un servicio ambiental basado en la capacidad de los ecosistemas forestales para absorber y almacenar el carbono atmosférico, así como en el manejo adecuado de estos ecosistemas, evitando su conversión en fuentes emisoras de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este servicio ambiental es el que rápidamente se está desarrollando a nivel global; el hecho de que una tonelada de carbono secuestrada en algún lugar del mundo emita el mismo impacto en la mitigación del efecto invernadero que cualquier otra tonelada secuestrada en otro punto del planeta, hace que este servicio genere un amplio impacto y un mercado global (FONAM, 2004). Proceso bioquímico mediante el cual el CO₂ atmosférico es absorbido y fijado por la biomasa vegetal como resultado de la fotosíntesis (Lino, 2009).

El secuestro de carbono ha adquirido relevancia en los últimos tiempos ya que es una de las pocas actividades que pueden disminuir la concentración atmosférica de CO₂ y mitigar el cambio climático. Existen mecanismos internacionales que ofrecen recompensas económicas en forma de pago por estos servicios. Los más importantes a través de los cuales es posible hacerlo son: el Protocolo de Kyoto, los MDL (*Mecanismos de Desarrollo Limpio*) y los

proyectos REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation in Developing countries*) (Medina, 2018).

2.8.5. Sumidero.

El concepto de sumidero, en relación con el cambio climático, fue adoptado en la Convención Marco de Cambio Climático de 1992. Un sumidero de gases de efecto invernadero, según la Convención, es cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera uno de estos gases o uno de sus precursores, o bien un aerosol que lo almacena. En el ámbito del Protocolo de Kyoto, la definición se limita a determinadas actividades de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura que se traducen en una captura del CO₂ presente en la atmósfera y su almacenamiento posterior en forma de materia vegetal. Esta captura de CO₂ contribuye a reducir la concentración de los Gases de Efecto Invernadero de la atmósfera, y por lo tanto, a mitigar el cambio climático (IPCC, 2007).

2.9. Estudios similares realizados en el almacenamiento y cuantificación de carbono en sistemas agroforestales

En un estudio realizado por Poveda *et al.* (2013) en sistemas agroforestales (SAFs) con base en cacao, se encontró que en promedio del SAF almacenaron 91,45 t C ha⁻¹. Los componentes del SAF que más carbono almacenaron fueron: suelo, biomasa aérea (plantas de cacao y árboles de sombra), raíces gruesas, raíces finas y hojarasca. Los autores infieren que estos SAFs en promedio fijan carbono total a razón de 5,4 t C ha⁻¹ año.

Sin embargo, Espinoza *et al.* (2012) menciona que los sistemas agroforestales con base en café capturan en promedio 110 t C·ha⁻¹, al ser sistemas perennes y con un manejo adecuado, donde los residuos que se incorporen al suelo se puede asegurar que esta cantidad de carbono almacenado se mantiene.

Hay que mencionar además que Espinoza *et al.* (2012) los resultados en biomasa aérea de los sistemas que incluyen al café, se encontró que los sistemas café + cedro rosado, café + macadamia, café + chalahuite y café + plátano, almacenan 115, 35, 31 y 28 t C·ha⁻¹, en ese orden donde los sistemas maduros muestran un incremento en el almacenamiento de carbono, comparado con los sistema más jóvenes. También menciona que el carbono en biomasa aérea es de 269 t C·ha⁻¹, pero en el bosque la tasa de secuestro es mayor, debido a que éste mantiene en la biomasa aérea la mayor cantidad posible de carbono almacenado. En los sistemas

silvopastoril y potrero se encontró en la biomasa aérea 3 y 2 t C·ha⁻¹, respectivamente. En ese orden, es un bajo almacenamiento de carbono, en comparación con los sistemas sin el componente animal.

Por su parte Mena *et al.* (2011), encontró en sistemas agroforestales con café que la máxima cantidad de C almacenado en biomasa total fue en promedio de 69,4 tC/ha⁻¹, con una variabilidad entre 9,9 y 208,6 tC/ha⁻¹. El Piso Altitudinal (PA) inferior a 600 m de altitud, presentó el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (93,7 tC/ha⁻¹). Así mismo los bosques secundarios mostraron el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (158,7 tC/ha⁻¹), encontrándose diferencias estadísticamente significativas ($p = .0036$) en el carbono almacenado en la biomasa total entre los PA inferior 600, medio 800 y superior 1 300 m de altitud (93,7; 79,6 y 34,8 t C ha⁻¹, respectivamente).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Materiales de campo.

Como materiales de campo se utilizaron: Cámara fotográfica, fundas plásticas para las muestras, tijera podadora, saquillos, libro de registros, marcador para etiquetar las muestras, lampa de muestreo.

3.1.2. Materiales de laboratorio.

Como materiales de laboratorio se utilizaron: Balanza analítica, erlenmeyers de 500 ml, buretas de precisión de 25 ml, pipetas de diferentes volúmenes, probeta de 100 ml, cronómetro, estufa, cilindros Kopecki, fundas de papel Kraft, ácido sulfúrico, ácido ortofosfórico concentrado, solución de dicromato de 1N.

3.2. Metodología

3.2.1. Localización del área de estudio.

La investigación se realizó en la Hacienda Cristal, ubicada en el cantón Loja, entre el barrio Tres leguas y Pueblo Nuevo de la parroquia San Sebastián, en la figura 2 se observa la ubicación de la hacienda Cristal a nivel de provincia.

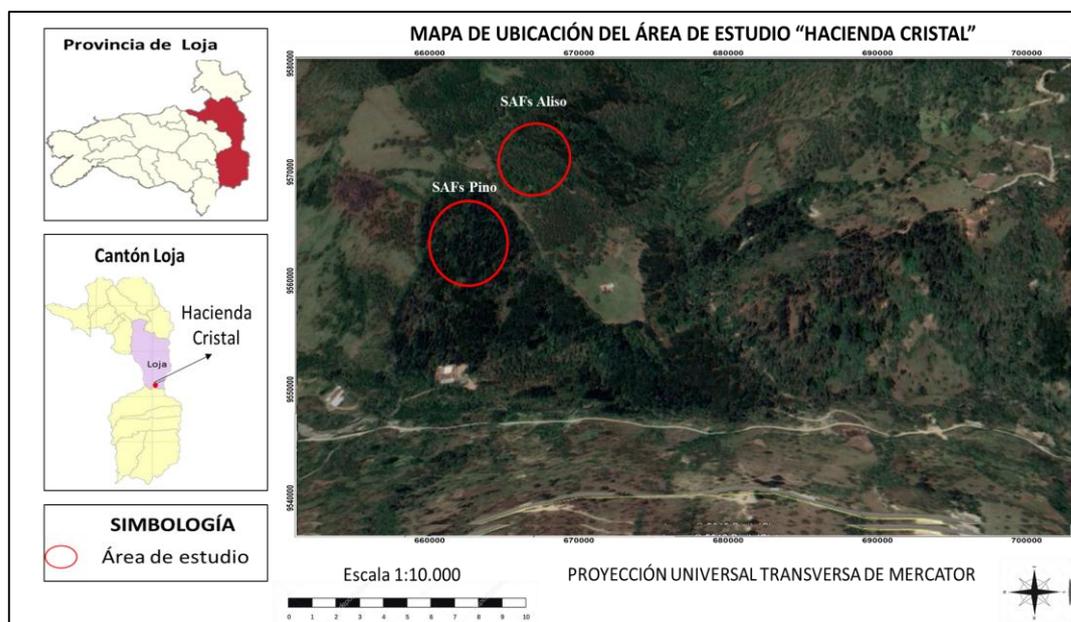


Figura 2. Mapa de la ubicación del área de estudio Hacienda Cristal

3.2.2. Ubicación geográfica.

La hacienda Cristal se encuentra ubicada en el barrio Tres leguas y Pueblo Nuevo en la zona de amortiguamiento del noreste del Parque Nacional Podocarpus de la parroquia San Sebastián, en un rango altitudinal de 1 950 a 2 040 m s.n.m. Limita al norte con la Hacienda Solorgo, al sur con la Quebrada San Francisco, al este con la Cordillera Real, al oeste con la Quebrada Pueblo Nuevo.

3.2.3. Condiciones climáticas.

Los datos climáticos corresponden a la estación meteorológica “La Argelia” ubicada a 2 100 m de la hacienda, que a continuación se detallan (cuadro 1).

Cuadro 1. Datos climáticos del parque universitario “Francisco Vivar Castro”.

Datos climáticos	Valor
Precipitación media anual	955 mm/año
Temperatura media anual	16,6°C
Humedad relativa media	71,96%
Evaporación media	111,33 mm
Velocidad del viento	3,64 – 5,44 m/s
Bio-clima	Sub-húmedo templado

Fuente: Palacios (2012).

3.3. Determinación de los componentes en cada uno de los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) en tres parcelas temporales en la “Hacienda Cristal”

3.3.1. Selección del área de estudio.

Para realizar esta investigación se utilizó la técnica de observación directa en campo, instalando parcelas temporales y procediendo a seleccionar los sitios representativos del lugar; para lo cual se consideró aspectos como: topografía del terreno (pendientes regulares) y uniformidad de la vegetación.

La parcela uno la integra la plantación de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) con una edad de quince años y el cultivo de café de catorce meses de edad sembrada a una

distancia de 2 x 1,5 m. La parcela dos se encuentra sembrada con una plantación de aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) de cuatro años de establecida y plantas de café con edad de doce meses, sembrada a una distancia de 2 x 1,5m las especies cultivadas corresponden al típica amarilla (mejorado). La plantación no cuenta con un sistema de riego, los arboles de sombra permanente son podados anualmente, se realizan deshierbas con machete y motoguadaña.

3.3.2. Establecimiento de las parcelas temporales estudiadas en cada uno de los SAFs cafeto.

Identificados los sitios de investigación en los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de pino y aliso respectivamente, se delimitó e instaló 3 parcelas temporales de 10 x 10 m (100 m²) cada una en el sistemas agroforestal de café con asocio arbóreo de pino y 3 parcelas temporales de 20 x 20 m (400 m²) cada una en el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de aliso, este tamaño se eligió debido a que ya existían parcelas establecidas con estas dimensiones para evaluaciones fisiológicas en otro proyecto de investigación, en cada parcela temporal se colocaron 3 trampas al azar de 2 x 2 m (4m²) a 20 cm de distancia del fuste del árbol para recolectar muestras de estrato herbáceo y hojarasca, dentro de cada trampa de muestreo se tomaron tres muestras de suelo al azar a un profundidad de 0-10, 10-20 y 20-40 cm.

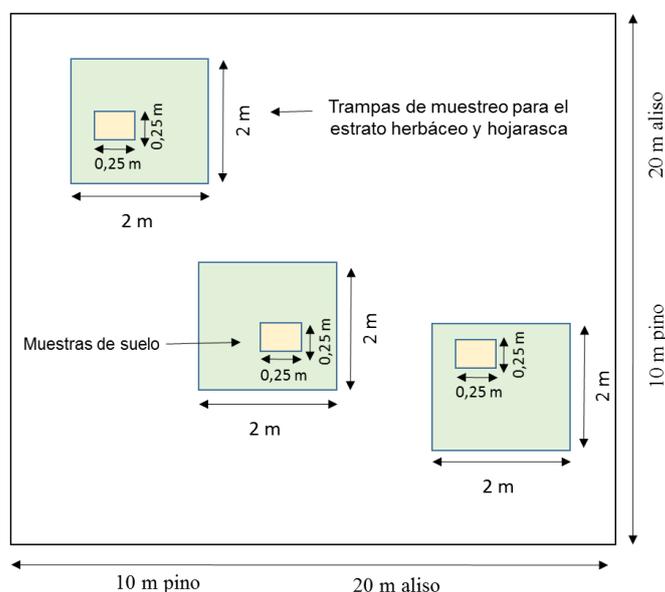


Figura 3. Diseño de las parcelas temporales en cada SAFs de café

El muestreo de estrato herbáceo y hojarasca se realizó en todas las trampas ya establecidas, cada 30 días por tres meses (dieciocho muestras totales por cada mes de evaluación en cada sistema agroforestal de café). El muestreo de suelo se lo realizó una sola vez instalando

parcelas temporales de 0,25 x 0,25 m (nueve muestras totales por cada sistema agroforestal de cafeto) a una profundidad de 0-10, 10-20 y 20-40 cm. El diseño de la investigación corresponde a un simple aleatorio con sub-muestreo, con igual número de repeticiones.

3.3.3. Metodología para el primer objetivo.

Cuantificar el almacenamiento de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*).

Para el muestro del estrato herbáceo y hojarasca se realizó la inspección visuales de las trampas previamente establecidas, posteriormente se separó la hojarasca y estrato herbáceo encontrada en el área de estudio, ya separados estos componentes, se pesaron para obtener el peso húmedo en campo.

Colectadas las muestras fueron llevadas al laboratorio de Bromatología de la Universidad Nacional de Loja, donde el estrato herbáceo fue cortado a dos cm de diámetro mientras que las muestras de hojarasca fueron homogenizadas en la cual posteriormente cada una de estas muestras fueron colocadas en bolsas de papel Kraft debidamente etiquetadas, y colocadas en la estufa a temperatura media de 105 °C para evitar la oxidación de las mismas, el secado se hizo por 24 horas monitoreando el peso hasta lograr un peso constante, que es el peso seco registrado. Determinando el contenido de humedad y peso seco para estimar la biomasa total.

Siguiendo lo recomendado por Pearson *et al.*, (2005), para la obtención de la biomasa se empleó la siguiente relación:

$$\mathbf{BT = ((PSM/PHM) \times PHT)}$$

Donde:

BT = biomasa total, materia seca (t/ha)

PSM = peso seco de la muestra colectada.

PHM = peso húmedo de la muestra colectada.

PHT = peso húmedo total

Con referencia a esto se determinó el contenido de carbono utilizando la siguiente formula, expresado en toneladas de carbono por ha:

$$\mathbf{C=BT \times FC}$$

Donde:

C = Carbono (t/ha)

BT = Biomasa total (t/ha)

FC= Fracción de carbono que en este caso se utilizó 0,5 establecido por el Panel Intergubernamental de Cambio climático (IPCC).

3.3.4. Metodología para el segundo objetivo.

Determinar el contenido de carbono almacenado en el suelo de los sistemas agroforestales de café con asoció arbóreo de pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*).

Para cumplir con este objetivo, se establecieron en las trampas señalados de 2 x 2 m, cuadrantes de 0,25 x 0,25 m, definiéndose capas entre: 0-10, 10-20 y 20-40 cm (Espinoza *et al.* 2012). En cada capa se determinó la densidad aparente del suelo utilizando cilindros de volumen conocido (100cc), que es el peso seco de un volumen determinado de suelo expresado en gramos por centímetro cúbico (g/cc).

Por cada capa se tomaron muestras de 500 gr correctamente identificadas y depositadas en bolsas plásticas y llevadas al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Loja donde se determinó el contenido de materia orgánica y carbono aplicando el método Walkley Black (1938). Para la transformación de porcentaje a toneladas de carbono por hectárea, se utilizó las formulas propuestas por la FAO (2011), Calderón y Solís (2012) y Castro (2011).

$$Pss = Da * Pm * 10\ 000\ m^2$$

Dónde:

Pss: Peso seco del suelo.

Da: Densidad aparente (gr/cm³).

Pm: Profundidad de la muestra (m).

10 000 m²: Equivalente a 1 ha en m²

$$Cs = \% C/100 * Pss$$

Dónde:

Cs: Contenido de carbono por tonelada y por hectárea.

% C: Porcentaje de carbono, valor obtenido a través de laboratorio

Pss: Peso seco del suelo

3.3.5. Carbono total almacenado.

El contenido de carbono total existente en los sistemas agroforestales de café con asoció arbóreo de pino y aliso respectivamente, es el resultado de la sumatoria de los valores obtenidos de cada componente, que se expresa en t/C/ha, a través de la siguiente expresión:

$$CTOTAL = C \text{ herbáceo} + C \text{ hojarasca} + C \text{ suelo}$$

Dónde:

C TOTAL: Contenido de carbono total de los SAFs café con aliso y pino respectivamente.

C herbáceo: Carbono en el compartimento herbáceo (biomasa) de los SAFs café con aliso y pino respectivamente.

C hojarasca: Carbono en la hojarasca de los SAFs café con aliso y pino respectivamente.

C suelo: Carbono en el compartimento suelo de los SAFs café con aliso y pino respectivamente.

3.4. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de las observaciones y el análisis de datos fueron desarrollados mediante análisis de varianza ANOVA obtenidos del programa estadístico statgraphics centurion, con tres repeticiones por cada sistema agroforestal de café, donde los tratamientos fueron el estrato herbáceo, hojarasca y suelo. Para efecto de comparación se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

4. RESULTADOS

4.1. Cuantificación del almacenamiento de carbono en el estrato herbáceo, hojarasca y suelo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

En esta investigación se realizaron mediciones del contenido de carbono en el estrato herbáceo, hojarasca y suelo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

4.1.1. Cuantificación del contenido de carbono en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

En el cuadro 2, se presentan los resultados del estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino y aliso. Los datos totales de este componente se presentan en el anexo 1 y 2.

Cuadro 2. Valores medios del contenido de carbono ($t/C/ha^{-1}$) fijado en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) y pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.), en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.

Cuantificación de C en el estrato Herbáceo del SAFs de café con aliso y pino			
	t/C/ha⁻¹	Coefficiente de Variabilidad	Desviación Estándar
Herbáceo aliso	0,0114 ^a	3,6202	0,0004
Herbáceo pino	0,0044 ^b	4,5251	0,0002
Total	0,0158		

Se presentan las medias de los datos obtenidos en el estrato herbáceo de cada uno de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de aliso y pino respectivamente, indicando que existen diferencias estadísticamente significativas, el sistema agroforestal de café con asociado arbóreo de aliso que presentó el más alto promedio con $0,0114 t/C/ha^{-1}$ a

diferencia del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino siendo el más bajo con 0,0044 t/C/ha⁻¹.

4.1.2. Cuantificación del contenido de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth).

En el cuadro 3, se presentan los resultados del contenido de carbono en la hojarasca del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) y pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham.). Los datos totales de este componente se presentan en el anexo 3 y 4.

Cuadro 3. Valores medios del contenido de carbono (t/C/ha⁻¹) fijado en la hojarasca de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) y pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham.), en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.

Cuantificación de C en la hojarasca del SAFs de cafeto con aliso y pino			
	t/C/ha⁻¹	Coefficiente de Variabilidad	Desviación Estándar
Hojarasca Aliso	0,0499 ^a	3,1925	0,0016
Hojarasca Pino	0,0415 ^b	2,5469	0,0011
Total	0,0914		

Se presentan las medias de los datos obtenidos en la hojarasca en cada uno de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino respectivamente, evidenciándose diferencias estadísticamente significativa indicando que el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso presentó el más alto promedio con 0,0499 t/C/ha⁻¹ en comparación con el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino que presentó un promedio de 0,0415 t/C/ha⁻¹ siendo el más bajo.

4.2. Almacenamiento del contenido de carbono en el suelo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth).

Según las profundidades evaluadas, el carbono almacenado en el suelo registro mayores cantidades a una profundidad de 0 – 10 cm a diferencia de los contenidos de carbono encontrado a una profundidad de 10 – 20 cm y 20 – 40 cm, donde se registran los menores valores; los valores totales se muestran en el anexo 5.

Cuadro 4. Valores medios del contenido de carbono t/C/ha⁻¹ fijado en el suelo a tres profundidades en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso, en la Hacienda Cristal, enero 2019.

Almacenamiento de C en el Suelo			
Profundidad (m)	t/C/ha⁻¹	Coefficiente de Variabilidad	Desviación Estándar
0 - 0,10	24,67 ^a	3,07	0,76
0,10 - 0,20	20,37 ^b	0,76	0,16
0,20 - 0,40	15,46 ^c	4,77	0,74
Total	60,5		

Los suelos del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso, evaluados a una profundidad de 0 – 40 cm, presentan un contenido de carbono de 60,5 t/C/ha⁻¹; distribuidas en 24,67 t/C/ha⁻¹ en la capa superior; 20,37 t/C/ha⁻¹ en la capa intermedia; y 15,46 t/C/ha⁻¹ en la capa inferior; el resultado encontrado es porque más del 60 % de carbono acumulado se encontró en los primeros 20 cm del suelo, profundidad a la que se encontró la materia orgánica en descomposición; es decir, el carbono orgánico del suelo activo se encuentra en constante descomposición y es más susceptible a factores externos (FAO, 2002).

Cuadro 5. Valores medios del contenido de carbono t/C/ha⁻¹ fijado en el suelo a tres profundidades en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino, en la Hacienda Cristal, enero 2019.

Almacenamiento de C en el Suelo			
Profundidad (m)	t/C/ha⁻¹	Coefficiente de Variabilidad	Desviación Estándar
0 - 0,10	13,85 ^a	4,16	0,58
0,10 - 0,20	8,81 ^b	2,72	0,19
0,20 - 0,40	7,80 ^c	1,41	0,10
Total	30,46		

Los suelos del sistemas agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino, evaluados a una profundidad de 0 – 0,40 cm, presentan un contenido de carbono de 30,46 t/C/ha⁻¹, de las cuales 13,85 t/C/ha⁻¹ se localizan en la capa superior; 8,81 t/C/ha⁻¹ en la capa intermedia; y 7,80 t/C/ha⁻¹ en la capa inferior, demostrando de esta manera que el carbono orgánico de suelo está altamente relacionado con el porcentaje de sombra debido a la presencia y abundancia de especies arbóreas que aportan sombra en el área y actividad radicular en el suelo (Sánchez, 2016). Los datos totales se presentan en el anexo 4.

4.2.1. Cuantificación total fijado en tres componentes (estrato herbáceo, hojarasca y suelo) de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) y pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.).

El contenido total de carbono orgánico fijado en los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino, está dado por los valores medios de carbono fijado en el estrato herbáceo, hojarasca y suelo a tres profundidades. (Ver cuadro 1, 2, 3, 4 y 5).

Cuadro 6. Valores medios de carbono fijado $t/C/ha^{-1}$, correspondiente a los componentes herbáceo, hojarasca y suelo de los sistemas agroforestales de café con asoció arbóreo de aliso y pino, en la Hacienda Cristal, noviembre, diciembre 2018 y enero 2019.

Tipo de ecosistema	SAFs Aliso	SAFs Pino
Componente	$t/C/ha^{-1}$	$t/C/ha^{-1}$
Herbáceo	0,0114	0,0044
Hojarasca	0,0499	0,0415
Suelo profundidad (m)		
0 - 0,10	24,67	13,85
0,10 - 0,20	20,37	8,81
0,20 - 0,40	15,46	7,80
TOTAL	60,56	30,51

Los sistemas agroforestales de café tanto del aliso como del pino no presentan ninguna similitud en lo que refiere a los contenidos de carbono fijado en cada componente, razón por la cual el contenido de carbono en el sistema agroforestal de café con asoció arbóreo de aliso es mayor con $60,56 t/C/ha^{-1}$ a diferencia del sistema agroforestal de café con asoció arbóreo de pino con $30,51 t/C/ha^{-1}$. El contenido de carbono en el componente suelo, está influenciado por la actividad microbiana, el contenido de hojarasca, la formación del humus y la lenta descomposición y mineralización de residuos vegetales y animales, lo que permite identificar que a medida que el suelo es más profundo el contenido de materia orgánica va disminuyendo.

Cuadro 7. Análisis del coeficiente de correlación entre las variables carbono estrato herbáceo, hojarasca y suelo en los SAFs de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

COEFICIENTES DE CORRELACION		ALISO				
		Car Herb	Carb Necr	COS (0.1m)	COS (0.2m)	COS (0.4m)
PINO	Car Herb	-0,76	-0,94	-0,82	0,92	0,07
	Carb Necr	0,85	-0,05	-0,31	0,09	-0,97
	COS (0.1m)	0,62	0,99	0,91	-0,98	0,12
	COS (0.2m)	-0,93	-0,15	0,12	0,10	0,91
	COS (0.4m)	-0,62	-0,99	-0,91	0,98	-0,12

En estos resultados la correlación de Pearson entre carbono COS aliso (0,2 m) y COS pino (0,4m) es 0,980, lo que indica que existe una relación positiva moderada entre las variables. La correlación de Pearson entre carbono hojarasca y COS pino (0,4m) indica que existe una muy buena relación con -0,99 así mismo COS aliso (0,2m) y COS pino (0,1m) es - 0,980 y entre carbono hojarasca con COS aliso (0,4m) es de -0,97 y carbono herbáceo con COS pino (0,2m) es -0,93. Las relaciones entre estas variables son negativas, lo que indica que a medida que la profundidad del suelo aumenta el contenido de carbono disminuye.

Cuadro 8. Regresión lineal entre el carbono del componente herbáceo, hojarasca y suelo en cada uno de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.).

COEFICIENTES DE DETERMINACION		ALISO				
		Car Herb	Carb Necr	COS (0.1m)	COS (0.2m)	COS (0.4m)
PINO	Car Herb	0,57	0,88	0,67	0,85	0,00
	Carb Necr	0,72	0,00	0,10	0,01	0,95
	COS (0.1m)	0,38	0,98	0,84	0,96	0,01
	COS (0.2m)	0,87	0,02	0,01	0,01	0,83
	COS (0.4m)	0,38	0,98	0,83	0,96	0,01

Como se puede observar en los resultados existe una relación lineal significativa entre COS aliso (0,2m) y el COS pino (0,4m) con 0,96 (p valor <0,05) sustentada en el rechazo de la hipótesis nula a un 5% del nivel de significancia. Así mismo se puede observar que existe una relación lineal significativa entre COS aliso (0,2m) y COS suelo pino (0,1m) con 0,96, también entre carbono hojarasca y COS pino (0,4m) con 0,98 sustentas en el rechazo de la hipótesis nula con un 5% mayor del nivel de significancia.

5. DISCUSIÓN

5.1. Cuantificación del contenido de carbono en el estrato herbáceo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbórea de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth).

El mayor contenido de carbono en el estrato herbáceo se presentó en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso con $0,0114 \text{ t/C/ha}^{-1}$ a diferencia de $0,0044 \text{ t/C/ha}^{-1}$ registrado en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino, estos datos se encuentran por debajo a lo reportado en Nicaragua por Connolly *et al.* (2007) en un estudio realizado sobre el almacenamiento y cuantificación de carbono en sistemas agroforestales y forestal, estimando un promedio de $0,98 \text{ t/C/ha}^{-1}$ en el estrato herbáceo del sistema de plantación de café ecoforestal.

Con respecto al contenido de carbono en el estrato herbáceo algunos autores manifiestan que es el segundo en aportar con rangos que van entre 4 a 8 % Chapín *et al.* (2002) y citado por Márquez (2005); en la investigación realizada por Sifuentes (2015) en sistemas agroforestales con café demuestra efectivamente que el estrato herbáceo almacena más carbono que la hojarasca, lo cual no concuerda con los resultados obtenidos, esto se debe a que son sistemas agroforestales manejados donde se realizan deshierbas, disminuyendo de esta manera la cantidad de biomasa fresca y por consiguiente el carbono en dicho componente; a esto se suma que los árboles establecidos en cada sistema presentan un fuste desarrollado donde además no se maneja sombra solamente se poda lo que ocasiona que exista en algunos sitios mucha sombra lo que limita el crecimiento del estrato herbáceo. Espinoza *et al.* (2012), acota que en un estudio denominado almacenes de carbono en sistemas agroforestales con café en México, obtuvo un mayor contenido de carbono en el tratamiento potrero (P), Bosque primario (Bop) y Silvopastoril (Sp) con $0,6 \text{ t/C/ha}^{-1}$, pero no logró obtener datos de C en estrato herbáceo para los tratamientos café-chalahuite (Ca + Ch), café - macadamia (Ca + Ma) y café-plátano velillo (Ca + Pl), debido a que los componentes arbóreo y arbustivo impiden el crecimiento de hierbas y a la cantidad de hojarasca producida por los mismos, valor que es mayor a lo encontrado en este estudio con los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino con $0,0114 \text{ t/C/ha}^{-1}$ y $0,0044 \text{ t/C/ha}^{-1}$ respectivamente.

5.2. Cuantificación del contenido de carbono en la hojarasca de los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth).

El contenido de carbono en la hojarasca del sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de pino es de 0,0415 t/C/ha⁻¹ y 0,0499 t/C/ha⁻¹, en el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de aliso, valores inferiores a lo encontrado por Calderón y Solís (2012), en un estudio realizado para el bosque de *Pinus oocarpa* en Nicaragua en los sitios de San Martín, El Sarrete y Campo Fresco con 3,7 t/C/ha⁻¹; en el bosque joven con 3,4 t/C/ha⁻¹ y en el bosque en regeneración con 2 t/C/ha⁻¹. Comparación que establece que el contenido de carbono en la hojarasca de un bosque depende del grado y tasa de descomposición, además de estar determinada por la composición química y física de los mismos, así como por las condiciones climáticas del lugar (Heath *et al.*, 2002).

Por otra parte en un estudio realizado por Masuhara *et al.* (2015), sobre la cuantificación de carbono en sistemas agroforestales (SAFs) que incluyen café, se obtuvo 5,55 t/C/ha⁻¹ en el sistema especializado - monocultivo de café con árboles de Inga como sombra (ESP), 4,53 t/C/ha⁻¹ en el sistema policultivo tradicional - café con árboles de uso múltiple (PTR) y 5,47 t/C/ha⁻¹ en el Bosque mesófilo de montaña (BMM), valor que es mayor comparado con los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de pino y aliso con 0,0415 t/C/ha⁻¹ y 0,0499 t/C/ha⁻¹ respectivamente. Los resultados presentados concuerdan en que la hojarasca es la principal fuente de carbono para la síntesis enzimática en la formación de humus, debido a que está compuesta de una fracción lábil que se descompone con rapidez (Chávez *et al.*, 2014).

Así mismo un estudio realizado por Espinoza *et al.* (2012) denominado almacén de carbono en sistemas agroforestales con café en México se encontró en el sistema del bosque caducifolio primario (BoP) y café + chalahuite que presentó la mayor cantidad de carbono en hojarasca con 1,9 t/C/ha⁻¹. Al mismo tiempo el tratamiento silvopastoril (Sp) y potrero (P) la cuantificación de la hojarasca presentó un valor de carbono cercano a cero, debido al manejo intensivo; por lo tanto, la formación de mantillo también es baja o se incorpora rápidamente al suelo. Esta diferencia se da debido a que estas mantienen secuestrado el carbono poco tiempo ya que al desintegrarse libera gran parte de carbono hacia la atmósfera (Ordoñez, 1999).

Loguercio (2005), afirman que la vegetación, en particular los bosques, almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa (tronco, ramas, corteza, hojas y raíces) y en el suelo (mediante su aporte orgánico). Además, Márquez (2000), menciona que los ecosistemas forestales almacenan carbono en cuatro fuentes: biomasa arriba del suelo, biomasa abajo del suelo, hojarasca, otra materia vegetal muerta y en el suelo.

La descomposición de la materia orgánica, es un importante proceso que relaciona la dinámica de la vegetación con la dinámica del suelo. Algunos autores mencionan que la temperatura es el factor climático más importante, especialmente en condiciones muy húmedas; mientras que otros autores aseguran que es la humedad el factor climático más importante (Arguello, 1991).

La concentración de materia orgánica fue menor en el sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino debido a que estuvo relacionada con la morfología del árbol especialmente sus acículas siendo pequeñas comparadas con las hojas del sistemas agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso; a esto se suma la pendiente del terreno que se encuentra establecido en el SAF de cafeto con asocio arbóreo de pino presentando una pendiente que supera el 30 % en relación al SAF de cafeto con asocio arbóreo de aliso que la pendiente es menor. La pendiente influye en la acumulación de hojarasca ya que con pendientes pronunciadas existe la pérdida de esta de acuerdo a la topografía del terreno.

5.3. Almacenamiento del contenido de carbono en el suelo de los sistemas agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth).

Al evaluar el contenido de carbono en el suelo de los sistemas agroforestales en base de los cultivos de café, se determinó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$), entre los dos SAFs agroforestales de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino, según los análisis de varianza.

En el presente estudio no fue incluida la biomasa de las raíces; sin embargo este comportamiento puede representar cantidades de biomasa y por lo tanto de carbono. El resultado total obtenido en esta investigación fue de $60,5 \text{ t/C/ha}^{-1}$ en el SAFs de cafeto con asocio arbóreo de aliso, seguido del SAFs de cafeto con asocio arbóreo de pino con $30,46 \text{ t/C/ha}^{-1}$, manteniendo la mayor acumulación de carbono de 0-10 cm de profundidad con $24,67 \text{ t/C/ha}^{-1}$ en el SAFs de cafeto con asocio arbóreo de aliso y $13,85 \text{ t/C/ha}^{-1}$ en el SAFs

de café con asocio arbóreo de pino, demostrando que a medida que se profundiza el muestreo en el suelo el contenido de carbono orgánico disminuye por la presencia de factores ambientales y bióticos. Lo que es similar a lo obtenido por Salas *et al.* (2018) donde registran 75,2 t/C/ha⁻¹ en la madre selva de Chiapas en los primeros 0-30 cm de profundidad, esto afirma lo expuesto por Reyes *et al.* (2003), que menciona que uno de los principales factores que determinan el rendimiento de carbono en el suelo es la cantidad de hojarasca y su velocidad de descomposición.

De la misma forma Mena *et al.* (2011) en un estudio realizado en sistemas agroforestales café y en bosques secundarios en Costa Rica, determinaron el almacenamiento de carbono a 30 cm de profundidad dando resultados de 96,5 t/C/ha⁻¹ en el sistema agroforestal café y 113,1 t/C/ha⁻¹ en el bosque secundario, determinado que no existe similitud con los datos obtenidos en los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de aliso y pino con 60,5 y 30,46 t/C/ha⁻¹ respectivamente a una profundidad de 0-40 cm. El suelo pierde humus en cultivos convencionales superando la tasa de formación de humus en suelos no perturbados, siendo fuente de CO₂ para la atmósfera (Kern y Johnson, 1993) esto indica que en sistemas con mayor nivel de sombra se reduce la pérdida de materia orgánica importante para el almacenamiento de carbono.

Corral *et al.* (2015), evaluó el contenido de carbono en sistemas agroforestal de café y cacao en dos zonas agroecológicas del literal Ecuatoriano. Presentando resultados de carbono orgánico del suelo COS (t/ha) para la localidad de Caluma de 92,2 t/C/ha⁻¹, mientras que en Pichilingue el contenido promedio de carbono fue de 54,4 t/C/ha⁻¹, es la medida presente en una profundidad de 0-30 cm. Estos resultados son similares a lo obtenido en el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de aliso presentando el mayor contenido de carbono con 60,5 t/C/ha⁻¹ a una profundidad de 0-40 cm manifestando que el COS a una mayor profundidad se encuentra menos procesado y con menos cantidad de compuestos microbianos derivados (Rumpel y Kögel, 2011) a pesar de existir biomasas microbianas más pequeñas, éstas son metabólicamente activas y contienen un número importante de microorganismos (Taylor *et al.*, 2002).

Hay que mencionar además que según Cadena (2015), en un estudio denominado almacenes de carbono en el suelo en una plantación de pino (*Pinus radiata* D. Don) provincia de Chimborazo, presentaron resultados de 126,59 t/C/ha⁻¹ a una profundidad de 20 cm, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de aliso y de pino a 20 cm de profundidad con 45,04 y 22,66 t/C/ha⁻¹, manifestado

por Killham (1994), en forma general el mayor porcentaje de contenido de carbono orgánico proviene de las plantas y de la descomposición de las raíces, obteniendo la mayor concentración de carbono orgánico presente en las capas superficiales del suelo.

En efecto Orgiazzi *et al.* (2016) menciona que la biodiversidad del suelo refleja el conjunto y la mezcla de organismos vivos que interactúan entre sí, como con plantas y animales pequeños, formando una red de actividad biológica. Por un lado, la biodiversidad del suelo contribuye en gran medida a la formación de MOS a partir de desechos orgánicos, contribuyendo así al aumento del contenido de COS. Por otra parte, la cantidad y calidad de la MOS (y consecuentemente del COS) determina el número y la actividad de organismos del suelo que interactúa con las raíces de las plantas. Por lo tanto, la estructura de la comunidad microbiana del suelo está influenciada en gran parte por la calidad y cantidad de COS, y en menor medida por la diversidad de las plantas (Thiele *et al.*, 2012).

La cantidad de carbono orgánico en el suelo es similar a las obtenidas en otras investigaciones los factores que influyen para contar con este recurso son las condiciones climáticas, el tipo de relieve, la vegetación, la textura, demostrando que estos son factores determinantes a la hora de determinar la cantidad y calidad de la hojarasca que se aporta al suelo; por otro lado las parcelas de estudio demostraron un textura franco arcilloso reteniendo más cantidad de materia orgánica en el suelo, permitiendo de esta manera el desarrollo del sistema radicular obteniendo como resultado un mayor contenido de carbono en el suelo (Simpson *et al.*, 2007).

5.4. Carbono total fijado en tres componentes (estrato herbáceo, hojarasca y suelo) de los sistemas agroforestales de café con asocio arbóreo de pino (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.)

El carbono total almacenado en el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de aliso presentó un promedio de 60,56 t/C/ha⁻¹ (Cuadro 5), encontrándose la mayor acumulación de carbono en el suelo a los 0 - 40 cm con 60,5 t/C/ha⁻¹, distribuidas en 24,67 t/C/ha⁻¹ en la capa superior; 20,37 t/C/ha⁻¹ en la capa intermedia; y 15,46 t/C/ha⁻¹ en la capa inferior, presentado diferencias estadísticamente significativas entre el estrato herbáceo, hojarasca con 0,0114 y 0,0499 t/C/ha⁻¹, en comparación con el sistema agroforestal de café con asocio arbóreo de pino que presentó un promedio sumamente bajo con 30,51 t/C/ha⁻¹, encontrándose la mayor acumulación de carbono en el suelo a una profundidad de 0 - 40 cm con 30,46 t/C/ha⁻¹, de las cuales 13,85 t/C/ha⁻¹ se localizan en la capa superior; 8,81 t/C/ha⁻¹ en la capa intermedia; y 7,8 t/C/ha⁻¹ en la capa inferior, presentando a su vez diferencias estadísticamente

significativas en el estrato herbáceo y hojarasca con 0,0044 y 0,0415 t/C/ha⁻¹ respectivamente; donde Ríos (2007), manifiesta que la tasa de absorción de carbono en los sistemas agroforestales, puede ser muy alta ya que la captura de carbono se efectuó tanto por los árboles como por los cultivos dependiendo de la duración.

Por lo tanto se comprueba lo citado por Vega y Martiarena (2010) quienes afirman, que es fundamental determinar el almacenamiento de carbono en los árboles, dado que las plantaciones brindan un importante servicio de limpieza ambiental por su potencial para secuestrar carbono. El carbono orgánico de suelo (COS) demostró mayor almacenamiento comparado con la hojarasca y el estrato herbáceo los cuales acumularon menor cantidad de C.

6. CONCLUSIONES

De los estratos en los SAFs estudiados el estrato suelo es que almacena mayor contenido de carbono siendo en los primero 0-0,10 cm de profundidad el que más acumulación presenta.

El sistema agroforestal cafeto con asocio arbóreo de aliso almacenó mayor cantidad de carbono en suelo, hojarasca y estrato herbáceo demostrando mayor potencial de mitigación frente al cambio climático.

Se encontró una relación directa entre cobertura vegetal aérea de los árboles de los sistemas agroforestales cafeto con la dinámica del carbono en el suelo, hojarasca y estrato herbáceo.

7. RECOMENDACIONES

Tener en cuenta la metodología y resultados de esta investigación como base para nuevos estudios en almacenamiento de carbono en el estrato herbáceo, hojarasca, suelo y realizar estudios comparativos de cada uno de los comportamientos en los diferentes sistemas agroforestales con café.

Realizar estudios comparativos en la misma finca pero en la época de sequía.

Realizar otros estudios de valoración de carbono en SAF con el análisis de otras variables ambientales.

Realizar estudios sobre la valoración del carbono en todo el sistema agroforestal café incluyendo el componente arbóreo y arbustivo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ACICAFOC, 2009. El cambio climático. San José, Costa Rica.
- Aguirre, J; Cadena, J; Ramírez, B; Trejo, B; Juárez, J. y Morales, F., 2016. Diversificación de cultivos en fincas cafetaleras como estrategia de desarrollo.. México.
- Aguirre, O. y Jiménez, J., 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. Monterrey, México.
- Albrecht, A. y Kandji, S., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems.. s.l.:Agriculture, Ecosystems and Environment.
- Arguello, H., 1991. La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. Colombia.
- Arjona, M., 2016. Sumideros de carbono. España: Grandes aliados en la lucha contra el cambio climático..
- Cadena, M., 2015. Determinación del contenido de carbono en el suelo en una plantación de pino (*Pinus radiata* D. Don) implementada en el páramo en la comunidad de Totoras, cantón Alausí, provincia de Chimborazo.. Chimborazo: s.n.
- Calderón, D. y Solís, D., 2012. Cuantificación del carbono almacenado en tres fincas en tres estados de desarrollo del bosque de Pino (*Pinus oocarpa*, L.) Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua.. Managua, Nicaragua: s.n.
- Castro, M., 2011. Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos - la experiencia en Oña-Nabón-Saraguro-Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua.. Quito.
- Cénicafe, 2005. El Aliso o Cerezo.. Colombia: s.n.
- Chapín, F., Matson, P. y Mooney, H., 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer, New York, New York: s.n.
- Chávez, B., Merino, A., Vázquez, M. y García, O., 2014. Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. México: s.n.

- Concha, J., Alegre, J. y Pocomucha, V., 2007. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *theobroma cacao* l. en el departamento de san martín, de Perú.. Lima-Perú: s.n.
- Connolly, W., Ronda, Y., Corea, S. y Carlos, A., 2007. Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua.. Nicaragua : Universidad Nacional Agraria, UNA..
- Corral, R., Duicela, L. y Maza, H., 2015. Fijación y almacenamiento de carbono en Sistemas Agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral Ecuatoriano. Ecuador: s.n.
- Damatta, F. y Rodríguez, N., 2007. Sustainable production of coffee in agroforestry systems in the Neotropics: An agronomic and ecophysiological approach. Colombia.: s.n.
- Dixon, R., Brown, S., Houghton, R., Solomon, A., Trexler, M. y Wisniewski, J., 2009. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. s.l.:American Association for the Advancement of Science.
- Donald, P., 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. s.l.:Conservation Biology .
- Duguma, B., Gockowski, J. y Bakala, J., 2000. Desafíos biofísicos y oportunidades para el cultivo.. Turrialba.: s.n.
- Durán, V., 2004. Sistemas Agroforestales. Santa Fé de Bogotá, Colombia: s.n.
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A. y Torres, A., 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. México: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. v. 18. N° 1. p. 57-70.
- FAO, 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂.. s.l.:Informes sobre recursos mundiales de suelos Roma.
- FAO, 2004. Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005. Roma.
- FAO, 2011. Manual de campo de la Evaluación Nacional Forestal. Quito-Ecuador.
- FAO, 2016. El estado de los bosques del mundo. Amazonas: 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. París, Francia: Informes Sobre recursos Mundiales de Suelos. .
- FAO., 2006. La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios.. s.l.:UN Food and Agriculture Organization .
- Farfán, F., 2014. Agroforestería y Sistemas Agroforestales con café. Caldas, Colombia : Cenicafé
- FONAM., 2004. Secuestro de carbono. Fondo Nacional del Ambiente - Perú.
- Heath, L., Birdsey, R. y D., W., 2002. Methodology for estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States. United States : s.n.
- Hopkins, M., 2012. Warming accelerates decomposition of decades-old carbon in forest soils.. s.l.:Proceedings of the National Academy of Sciences..
- Ibáñez, J., 2014. Botánica agronómica, forestal y de jardín.. Madrid, España.: s.n.
- INECC, 2007. El Carbono. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. .
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007. Suiza: Contribución de los Grupos de trabajo I, II Y III al Cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Ginebra.
- IPCC, 2014. Cambio Climático Impactos, adaptación y vulnerabilidad.. s.l.:s.n.
- Kern, J. y Johnson, M., 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels.. s.l.:s.n.
- Killham, K., 1994. Soil ecology. s.l.:Cambridge: Cambridge University.
- Kutsch, W., Bahn M. y Heinemeyer, A., 2009. Soil Carbon Dynamic: an integrated methodology Cambridge University Press. New York.
- Lavelle, P. y Spain, A., 2005. Soil Ecology:.. Netherlands: Published by Springer..
- Lino, M., 2009. La traducción de la biología a la clínica: en el caso del glioblastoma. Opinión actual de la biología celular.
- Loguercio, G., 2005. Cambio Climático: El Rol de los Bosques Como Sumideros de Carbono.. : Secretaría Académica.

- Lonsdale, W., 1988. La predicción de la cantidad de hojarasca en los bosques del mundo. *Annals of Botany* 61.
- Márquez, L., 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. CO₂ en el uso del suelo.. Guatemala: Fundación SOLAR.
- Márquez, T., 2005. Cálculo de Biomasa y Captura de Carbono en Cuatro Sistemas Agroforestales de Café con Sombra, en Tarapoto. Informe de Prácticas Preprofesionales.. Universidad Nacional Agraria de la Selva. ed. Perú: Fac. Recursos Naturales Renovables: Mención Forestales. Tingo María.
- Masuhara, A. y Eduardo Valdés., 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. Veracruz, México: Revista Amazónica Ciencia y Tecnología. v.4. N° 1. p. 66-93.
- Medina, J., 2018. Diversidad florística y estimación de la captura de carbono en tres ecosistemas del parque universitario "Francisco Vivar Castro", cantón Loja, Ecuador. Loja.
- Mena, V., Andrade, H. y Navarro, C., 2011. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica.. Costa Rica.
- Mesa, M., 2016. Pinos autóctonos y conservación de bosques en andalucia.. Sierra Nevada.
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., Meyer, L., 2005. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono.. Naciones Unidas.
- Oades, J., 1988. The retention of organic matter in soils. s.l.:Biogeochemistry.
- Ordoñez, M., 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán, Instituto Nacional de Ecología. México: SEMARNAP.
- Orellana, G., Sandoval, M., Linares, G., García, N., Tamariz, J., 2012. Descripción de la dinámica del carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorio. Chile: Redalib. v. 3. N° 1. p. 123-135.
- Orgiazzi, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S. y Scheu, S., 2016. Global Soil Biodiversity Atlas. Luxembourg: Oficina de publicaciones de la Unión Europea, Comisión Europea..

- Ortiz, Á. y Riascos, L., 2006. Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao* L) y laurel (*Cordia alliodora*). Costa Rica: CATIE . v. 1. p. 6-10.
- Pearson, T; Walker, S. and Brown, S., 2005 Sourcebook for BioCarbon Fund projects. Prepared for BioCarbon Fund of World Bank.
- Poveda, V., Orozco, L., Medina, C., Cerda, R. y López, A., 2013. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua.. Managua, Nicaragua.: s.n.
- Prentice, I., 2001. "The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide". s.l.:Climate change 2001.
- Ramírez, O., Finegan, B., Rodríguez, L., y Ortiz, R., 1994. Análisis económico de impactos ambientales In: Estudios de caso: Evaluación económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono: El caso de un bosque húmedo tropical bajo diferentes estrategias de mercado sostenible. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Rattan, L., 2008. "Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools". s.l.:Energy and Environmental CO₂ in global carbon pools" Science.
- Reyes, B., Zamora, E., Reyes, M., Frias, J., Olalde, V. y Dendooven, L., 2003. Decomposition of leaves of huizache (*Acacia tortuosa*) and mesquite (*Prosopis* spp) in soil of the central highlands of Mexico.. México.
- Ríos, A., 2007. Almacenamiento de Carbono y valoración económica en sistemas de uso de Tierra comparados con el cultivo de coca (*Erythroxylon coca* L.) en el distrito de José Crespo y Castillo. Perú:
- Roig, S., Mutken, S., Ayans, A., López, C., Gonzalo, J. y Ponce, R., 2010. Sistemas agroforestales como sumideros de carbono hacia un modelo conjunto de la vegetación y el suelo. El Salvador, Costa Rica.: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).
- Román, M., Mora, A. y González, G., 2016. Sistemas agroforestales con especies de importancia maderable y no maderable en el trópico seco de México.. Guadalajara, México.

- Rügnitz, M., Chacón, M. & Porro, R., 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima-Perú: Consorcio Iniciativa Amazónica.
- Rumpel, C. y Kögel, I., 2011. Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle.. s.l.:s.n.
- Salas, V., Paz, F., Rojas, F. y Bolaños, M., 2018. Almacenes de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros de la Sierra de Chiapas. México: Programa Mexicano del Carbono.
- Sánchez, D., 2016. Dinámica del carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundimarca. Bogotá, Colombia.
- Saugier, B. y Pontailier, J., 2006. El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. Bolivia: Redalic. v. 41. N° 3. p. 71-84.
- Sifuentes, V., 2015. Carbono almacenado y capturado en la biomasa aérea en tres Sistemas Agroforestales (SAF) en Saipai, Santa Lucía. Tingo María- Perú: Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP)-HUANUCO.
- Simpson, A, Song, G., Smith, E., Lam, B., Novotny, E. y Hayes, M., 2007. Unraveling the Structural components of soil humin by use of solution-state nuclear magnetic resonance spectroscopy..
- Somarriba, E., Harvey, C., Samper, M., González, J., Staver, C. y Rice, R., 2004. Biodiversity conservation in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations.. Washington.
- Taylor, J., B. Wilson, M., Mills, S. y Burns, R., 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques.. Soil Biol. Biochem.: s.n.
- Thiele, Bruhn; Bloem, J; Vries, F; Kalbitz, K. y Wagg, C., 2012. Linking soil biodiversity and agriculture soil management.
- Useros, J., 2012. El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. Valladolid: Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid.
- Vega, G., Claudia, O., Suarez, J. y López, C., 2014. Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. Huila, Colombia: Revista de investigación Agraria y Ambiental. v. 5. N° 1. p. 213-219.

Vega, J. y Martiarena, R., 2010. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de araucaria (*Araucaria angustifolia* Bert- O. Ktze). s.l.:Revista de Ciencia y Tecnología versión. v, 19. N° 13. p. 79-86.

9. ANEXOS

Anexo 1. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ del estrato herbáceo del sistema agroforestal cafeto con asocio arbóreo de aliso.

Parcelas Aliso	Estrato	Peso verde total (Kg/m2)	Peso verde	Peso seco	Biomasa total (t/ha)	Carbono (t/ha)
1	Herbáceo	0,03	124,4	33,4	0,06	0,03
1	Herbáceo	0,01	33,6	6,8	0,02	0,01
1	Herbáceo	0,02	86,8	10,4	0,03	0,01
2	Herbáceo	0,00	14,3	2,8	0,01	0,00
2	Herbáceo	0,01	26,2	5,2	0,01	0,01
2	Herbáceo	0,04	156,1	21,1	0,05	0,03
3	Herbáceo	0,00	8,5	1,2	0,00	0,00
3	Herbáceo	0,00	17,0	4,0	0,01	0,01
3	Herbáceo	0,02	62,2	13,1	0,03	0,02
Suma					0,21	0,11

Anexo 2. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ del estrato herbáceo del sistema agroforestal cafeto con asocio arbóreo de pino.

Parcelas Pino	Estrato	Peso verde total (Kg/m2)	Peso verde	Peso seco	Biomasa total (t/ha)	Carbono (t/ha)
1	Herbáceo	0,00	11,1	2,6	0,01	0,00
1	Herbáceo	0,00	2,3	0,2	0,00	0,00
1	Herbáceo	0,00	14,2	3,4	0,00	0,00
2	Herbáceo	0,00	9,0	1,2	0,00	0,00
2	Herbáceo	0,01	26,9	5,2	0,01	0,01
2	Herbáceo	0,01	24,3	5,5	0,01	0,01
3	Herbáceo	0,00	12,6	2,1	0,01	0,00
3	Herbáceo	0,01	22,1	4,3	0,01	0,01
3	Herbáceo	0,01	29,5	7,7	0,02	0,01
Suma					0,07	0,0403

Anexo 3. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ de la hojarasca del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso.

Parcelas	PHM	PSM	PHT (Kg/m ²)	BT (t/ha)	C (t/ha)	PHM	PSM	PHT (Kg/m ²)	BT (t/ha)	C (t/ha)	PHM	PSM	PHT (Kg/m ²)	BT (t/ha)	C (t/ha)
P1 R1	54,5	46,6	0,01	0,12	0,06	21,9	17,5	0,01	0,044	0,02	27,4	10,3	0,0	0,03	0,01
	54,4	46,5	0,01	0,12	0,06	35	28,9	0,01	0,072	0,04	35,8	12,9	0,0	0,032	0,02
	50,1	50,6	0,01	0,13	0,06	17,9	14,5	0,00	0,036	0,02	35	12,6	0,0	0,032	0,02
P1 R2	115,3	103,1	0,03	0,26	0,13	25,9	21	0,01	0,053	0,03	36,3	13,3	0,0	0,033	0,02
	94,8	84,6	0,02	0,21	0,11	32,2	26,1	0,01	0,065	0,03	36,4	14,2	0,0091	0,036	0,02
	93,6	83,5	0,02	0,21	0,10	33,8	27,7	0,01	0,069	0,03	37,3	14,3	0,0	0,036	0,02
P1 R3	112,9	100,0	0,03	0,25	0,13	30,6	25,4	0,01	0,064	0,03	50,5	18,9	0,0	0,047	0,02
	115,7	102,5	0,03	0,26	0,13	51,4	41,5	0,01	0,104	0,05	57,9	21,4	0,0	0,054	0,03
	69,4	61,4	0,02	0,15	0,08	53,5	44,9	0,01	0,112	0,06	61,7	23,7	0,0	0,059	0,03
P2 R1	121,5	107,7	0,03	0,27	0,13	22,6	18,7	0,01	0,047	0,02	41,8	13,4	0,0	0,034	0,02
	104	92,1	0,03	0,23	0,12	34,8	28,3	0,01	0,071	0,04	34,7	12,5	0,0	0,031	0,02
	116,5	103,5	0,03	0,26	0,13	33,7	27,8	0,01	0,070	0,03	32,8	11,9	0,0082	0,030	0,01
P2 R2	85,4	75,8	0,02	0,19	0,09	41,7	34,6	0,01	0,087	0,04	20,1	8,1	0,0	0,020	0,01
	91,4	80,8	0,02	0,20	0,10	70,8	58,9	0,02	0,147	0,07	20,5	8,3	0,0	0,021	0,01
	89,5	78,8	0,02	0,20	0,10	48,7	41,2	0,01	0,103	0,05	23	9,1	0,0	0,023	0,01
P2 R3	109,1	95,6	0,03	0,24	0,12	27,3	21,6	0,01	0,054	0,03	19,3	8,2	0,0	0,021	0,01

	61	53,4	0,02	0,13	0,07	35,2	29,5	0,01	0,074	0,04	19,2	8,1	0,0048	0,020	0,01
	91,7	80,4	0,02	0,20	0,10	26	20,6	0,01	0,052	0,03	13,8	5,9	0,0	0,015	0,01
P3 R1	62,4	57,3	0,02	0,14	0,07	29,1	24,2	0,01	0,061	0,03	18,5	7,8	0,0	0,020	0,01
	53,8	49,1	0,01	0,12	0,06	35,5	29,5	0,01	0,074	0,04	29,7	12,9	0,0	0,032	0,02
	77,8	71,6	0,02	0,18	0,09	54,6	46,9	0,01	0,117	0,06	24,5	10,9	0,0	0,027	0,01
P3 R2	99,7	90,3	0,02	0,23	0,11	30,3	25,6	0,01	0,064	0,03	19,5	8,2	0,0	0,021	0,01
	71,8	65,0	0,02	0,16	0,08	49,2	42,5	0,01	0,106	0,05	18,8	8,2	0,0047	0,021	0,01
	81,8	74,6	0,02	0,19	0,09	31,9	27	0,01	0,068	0,03	20,7	9,1	0,0	0,023	0,01
P3 R3	81,7	74,8	0,02	0,19	0,09	47,7	40,3	0,01	0,101	0,05	34,5	19,5	0,0	0,049	0,02
	50	45,1	0,01	0,11	0,06	51	42,5	0,01	0,106	0,05	45,9	17,4	0,0	0,044	0,02
	57,9	52,7	0,01	0,13	0,07	51	42,6	0,01	0,107	0,05	51,3	13,6	0,0	0,034	0,02

Anexo 4. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $C = \text{Biomasa total} \times 0,5$ de la hojarasca del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de pino.

Parcelas	PHM	PSM	PHT (Kg/m2)	BT (t/ha)	C (t/ha)	PHM	PSM	PHT (Kg/m2)	BT (t/ha)	C (t/ha)	PHM	PSM	PHT (Kg/m2)	BT (t/ha)	C (t/ha)
P1 R1	50,9	43,8	0,01	0,11	0,05	54,7	37,3	0,01	0,09	0,05	51,9	23,8	0,01	0,06	0,03
	51,7	44,5	0,01	0,11	0,06	42,1	27,9	0,01	0,07	0,03	52,1	24,3	0,01	0,06	0,03
	43,2	36,7	0,01	0,09	0,05	47,5	32,5	0,01	0,08	0,04	49,5	22,8	0,01	0,06	0,03
P1 R2	62,3	52,8	0,02	0,13	0,07	46,9	33,4	0,01	0,08	0,04	56,2	24,8	0,01	0,06	0,03
	65,6	55,7	0,02	0,14	0,07	46,5	34,1	0,01	0,09	0,04	51,6	23,1	0,01	0,06	0,03
	70,9	60,2	0,02	0,15	0,08	59,4	41,5	0,01	0,10	0,05	51,1	23	0,01	0,06	0,03
P1 R3	53,5	44,6	0,01	0,11	0,06	42,7	30,7	0,01	0,08	0,04	47,5	20,6	0,01	0,05	0,03
	60,5	50,5	0,02	0,13	0,06	31,4	22,8	0,01	0,06	0,03	54,9	24,8	0,01	0,06	0,03
	50,1	41,8	0,01	0,10	0,05	48,7	34,4	0,01	0,09	0,04	53,4	24	0,01	0,06	0,03
P2 R1	59,8	49,1	0,01	0,12	0,06	39,7	30,1	0,01	0,08	0,04	48,8	17,8	0,01	0,04	0,02
	46,2	38,2	0,01	0,10	0,05	54,5	41,9	0,01	0,10	0,05	37,8	15,9	0,01	0,04	0,02
	44,2	37,3	0,01	0,09	0,05	36,3	27	0,01	0,07	0,03	43,4	18,4	0,01	0,05	0,02
P2 R2	63	53,6	0,02	0,13	0,07	62,1	44,5	0,02	0,11	0,06	38,8	16,5	0,01	0,04	0,02
	53,6	45,3	0,01	0,11	0,06	65,4	46,8	0,02	0,12	0,06	42,4	18,2	0,01	0,05	0,02
	79,2	67,3	0,02	0,17	0,08	50,7	36,5	0,01	0,09	0,05	41,3	17,7	0,01	0,04	0,02

P2 R3	46,8	39,2	0,01	0,10	0,05	32,3	24,3	0,01	0,06	0,03	47	20,2	0,01	0,05	0,03
	40,8	34,3	0,01	0,09	0,04	23,9	16,8	0,01	0,04	0,02	44,7	19,8	0,01	0,05	0,02
	50,4	41,7	0,01	0,10	0,05	23,8	16,7	0,01	0,04	0,02	38,3	16,6	0,01	0,04	0,02
P3 R1	66,9	55,7	0,02	0,14	0,07	59,2	37	0,01	0,09	0,05	32,2	14	0,01	0,04	0,02
	76	63,2	0,02	0,16	0,08	57,1	36,1	0,01	0,09	0,05	34,7	14,9	0,01	0,04	0,02
	61,2	48,2	0,02	0,12	0,06	66,5	42,9	0,02	0,11	0,05	32	13,9	0,01	0,03	0,02
P3 R2	48,8	40,6	0,01	0,10	0,05	41,2	30,7	0,01	0,08	0,04	32,6	13,7	0,01	0,03	0,02
	36,8	30,3	0,01	0,08	0,04	53,1	38,8	0,01	0,10	0,05	31,5	13,5	0,01	0,03	0,02
	46,5	40,8	0,01	0,10	0,05	49,1	34,9	0,01	0,09	0,04	44,5	18,4	0,01	0,05	0,02
P3 R3	73,9	63,0	0,02	0,16	0,08	59,6	39,2	0,01	0,10	0,05	39,2	16,3	0,01	0,04	0,02
	80,2	67,9	0,02	0,17	0,08	63,3	42,5	0,02	0,11	0,05	51,9	21,8	0,01	0,05	0,03
	96,8	70,5	0,02	0,18	0,09	63,9	42,5	0,02	0,11	0,05	44,4	17,9	0,01	0,04	0,02

Anexo 5. Contenido de carbono aplicando la fórmula: $P_{ss} = D_a * P_m * 10\ 000\ m^2$ del suelo del sistema agroforestal de cafeto con asocio arbóreo de aliso y pino.

		%M	Da (g/cm ³)	Peso seco (PSS)	P (cm)	P(m)	% COS	COS (t/ha)
ALISO	Parcela 1	5,68	0,760	760	10	0,1	3,0	22,80
		4,85	0,76	1520	20	0,2	1,3	20,40
		3,72	0,76	3040	40	0,4	0,6	18,18
	Parcela 2	5,68	0,84	840	10	0,1	3,0	25,20
		5,20	0,84	1680	20	0,2	1,3	21,50
		1,95	0,84	3360	40	0,4	0,5	16,30
	Parcela 3	6,15	0,80	800	10	0,1	3,3	26,00
		5,91	0,80	1600	20	0,2	1,2	19,20
		5,14	0,80	3200	40	0,4	0,4	11,90
PINO	Parcela 1	4,47	0,74	740	10	0,1	2,4	17,48
		3,81	0,74	1480	20	0,2	0,8	12,30
		1,42	0,74	2960	40	0,4	0,3	10,1
	Parcela 2	4,26	0,46	460	10	0,1	2,3	10,35
		2,60	0,46	920	20	0,2	0,8	7,18
		1,24	0,46	1840	40	0,4	0,3	6,26
	Parcela 3	4,26	0,61	610	10	0,1	2,3	13,73
		3,07	0,61	1220	20	0,2	0,6	6,95
		2,13	0,61	2440	40	0,4	0,3	7,15

Anexo 6. Análisis estadístico obtenidos del programa estadístico statgraphics centurion tanto del anova como la comparación múltiple de Tukey.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.0134039	3	0.00446796	4528.02	0.0000
Intra grupos	0.0000315756	32	9.86736E-7		
Total (Corr.)	0.0134355	35			

Anexo 7. Análisis estadístico prueba de múltiples rangos obtenida del programa estadístico statgraphics centurion.

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
CH PINO	9	0.00443333	X
CH ALISO	9	0.0114	X
CN PINO	9	0.0415222	X
CN ALISO	9	0.0499333	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
CH ALISO - CH PINO	*	0.00696667	0.00126891
CH ALISO - CN ALISO	*	-0.0385333	0.00126891
CH ALISO - CN PINO	*	-0.0301222	0.00126891
CH PINO - CN ALISO	*	-0.0455	0.00126891
CH PINO - CN PINO	*	-0.0370889	0.00126891
CN ALISO - CN PINO	*	0.00841111	0.00126891

* indica una diferencia significativa.

Anexo 8. Fotografías del área de estudio en cada uno de los sistemas agroforestales de café con asociado arbóreo de pino y aliso.



Anexo 9. Folleto informativo de resultados obtenidos en la Hacienda Cristal



Anexo 10. Registro de asistencia a la socialización de resultados.

REGISTRO DE ASISTENCIA PARA LA SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS DE TESIS				
EVALUACIÓN DE CARBONO EN HOJARASCA Y SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFETO (<i>Coffea arábica</i> L.) CON PINO (<i>Pinus patula</i>) Y ALISO (<i>Alnus acuminata</i>) EN EL CANTÓN LOJA				
N ^{ro}	Fecha	Apellidos y Nombres	CI	Firma
1	17/06/2019	Romero Romero Mario José	1150209393	
2	17/06/2019	Romeo Mora Adriana Elizabeth	1105631012	
3	17/06/2019	JAEEN RIGAUD XINGHA MARIÚ	1104452139	
4	17/06/2019	Aponte Vera Arianna Lizzette	1105456568	
5	17/06/2019	Teresa Alexandra Jiménez	190078681	
6	17/06/2019	Norma Morochio Paqui	1950015048	
7	17/06/2019	José Esteban Guachanani	1105899826	
8	17/06/2019	José Eduardo Romero N	1150351847	
9	17/06/2019	David Alejandro Fernández	1105023327	
10	17/06/2019	Yessenio Ampio Lopez Solos	1105320129	
11	17/06/2019	Tatiana Patricia Cavión Sánchez	1105032583	
12	17/06/2019	Maxiana Leticia Valdez Paucar	1105538522	
13	17/06/2019	Hermel Mateo Romero Zhingre	0750595669	
14	17/06/2019	Rosa Rodríguez Sarango	11042262114	
15	17/06/2019	Edison Saúl Simón C	1150142433	
16	17/06/2019	Jhon Alexander Correa Campoverde	1105777922	
17	17/06/2019	Jholissa Stephanie Amboldi B	1105678600	
18	17/06/2019	Damaris Geanine Pereira Sarmiento	115116835	
19	17/06/2019	Maria de los Angeles Celi C.	1150068185	
20	17/06/2019	Dayanna Michelle Ortega	1150252227	