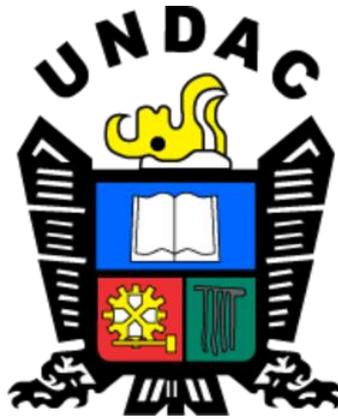


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor: Bach. Astrid Liseth PUSARE THOMAS

Asesor: Mg. Julio Antonio ASTO LIÑAN

Oxapampa – Perú – 2021

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Eleuterio Andrés ZAVALETA SANCHEZ

PRESIDENTE

Mg. Luis Alberto PACHECO PEÑA

MIEMBRO

Mg. Jesús Marino GOMEZ MIGUEL

MIEMBRO

DEDICATORIA

*A Javier y Elizabeth, mis padres,
por el deseo de superación que me
brindan en cada etapa de mi vida,
por la motivación y apoyo
constante en momentos difíciles.*

*Gracias a ellos muestro el
resultado de mi esfuerzo y
dedicación.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestro señor Dios, por ofrecerme la oportunidad de vivir y dirigir mis pasos día a día, por haber colocado en mi sendero diversas personas que fueron mi compañía y soporte durante toda la duración de la investigación.

A mis padres, quienes han sabido luchar y trabajar de forma incondicional e incesante para brindarme bienestar y educación, permitiéndome crecer como persona con el fin de que pueda cumplir mis metas y sueños propuestos en mi vida, a ellos mi eterno amor, respeto y admiración.

Al asesor de tesis Mg. Julio Antonio Asto Liñan, por su conocimiento, confianza y apoyo con la investigación.

A los jurados calificador Mg. Eleuterio Andrés Zavaleta Sánchez, Mg. Luis Alberto Pacheco Peña y Mg. Jesús Gómez Miguel, por sus observaciones y recomendaciones indicadas en la presente investigación.

Al Ing. Yoseph Cronwell Ojeda Enríquez por su valiosa dirección, disposición de tiempo, paciencia e incondicional apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Ing. Edson Valery Ramos Peñaloza, por su apoyo y tiempo destinado para la realización de determinaciones realizadas en el Laboratorio.

A mis amigos y amigas por brindarme su apoyo, escucha, buena vibra y ánimos en todo momento.

A ustedes, que se merecen toda la dicha y felicidad, les brindo este logro, con el fin de retribuirles en algo toda la felicidad, toda la estima y el apoyo que me brindaron siempre.

RESUMEN

El presente estudio fue realizado con el objetivo de valorar económicamente el servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en el distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020. Para esto fue abordado una comparación de la capacidad de almacenamiento de carbono entre sistemas agroforestales de café y como referencia de un sistema no agroforestal se incluyó un bosque nativo: i) sistema agroforestal de café-pacay con el bosque nativo y ii) sistema agroforestal café-pino con bosque nativo.

La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo fue determinada empleando la “Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales; metodología desarrollada por el ICRAF”. En cada sistema de tratamiento se establecieron tres parcelas de muestreo de 1m² y en cada una de ellas se extrajeron muestras de suelo (30 cm profundidad) para la determinar la densidad aparente y el carbono orgánico (%). El método de calcinación y del cilindro de volumen conocido fueron empleados para determinar la materia orgánica y la densidad, respectivamente. Para el análisis de variables se realizó el ANOVA, prueba de Tukey y correlación y regresión.

Los resultados del estudio indicaron que la capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo es mayor en el bosque nativo (431 tCO₂e/ha, USD 11,766.57) que en los sistemas agroforestales del cultivo de café (249.944 tCO₂e/ha, USD 6,810.997 en A; y 190.690 tCO₂e/ha, USD 5,196.308 en B). Sobre la base de ello, el sistema agroforestal que mejor se adaptaría a los efectos del cambio climático es el sistema agroforestal de café asociado a la especie pacay por tener mayor capacidad de almacenamiento de carbono y mayor valor económico.

Palabras claves: Sistema agroforestal, almacenamiento de carbono, servicio ambiental y valoración económica.

ABSTRACT

The present research was carried out with the aim of economically assessing the environmental service of soil organic carbon storage in coffee agroforestry systems (*Coffea arabica* L.) in the district of Chontabamba, Oxapampa province, Pasco region – 2020. For this, a comparison of the carbon storage capacity between agroforestry coffee systems was addressed and as a reference of a non-agroforestry system a native forest was included: i) coffee-pacay agroforestry system with the native forest and ii) coffee-pine agroforestry system with native forest.

The capacity of the environmental service to store organic carbon in the soil was determined using the "Guide for the determination of carbon in small rural properties; methodology developed by ICRAF". In each treatment system, three sampling plots of 1m² were established and in each of them soil samples (30 cm depth) were extracted to determine the bulk density and organic carbon (%). The calcination method and the cylinder of known volume were used to determine organic matter and density, respectively. For the analysis of variables, the ANOVA, Tukey test and correlation and regression were performed.

The results of the study indicated that the capacity and economic value of the environmental service of soil organic carbon storage is greater in the native forest (431 tCO₂e/ha, USD 11,766.57) than in the agroforestry systems of coffee cultivation (249,944 tCO₂e/ha, USD 6,810,997 in A; and 190,690 tCO₂e/ha, USD 5,196,308 in B). Based on this, the agroforestry system that would best adapt to the effects of climate change is the agroforestry coffee system associated with the pacay species because it has greater carbon storage capacity and greater economic value. Keywords: Agroforestry system, carbon storage, environmental service and economic valuation.

Keywords: Agroforestry system, carbon storage, environmental service and economic valuation.

INTRODUCCIÓN

Los gases capaces de retener calor en la atmósfera se denominan gases de efecto invernadero (GEI). El incremento de emisiones y mayor presencia de estos gases, es una de las causas del cambio climático, si bien los gases como el dióxido de carbono (CO_2) se producen de forma natural en la atmósfera, a través de nuestra interferencia con el ciclo del carbono (mediante la quema de carbón, tierras forestales o la extracción del carbón), movemos artificialmente el carbono desde el almacenamiento sólido a su estado gaseoso, aumentando así las concentraciones atmosféricas. El cambio climático ya ha tenido efectos observables en el medio ambiente por lo que es uno de los problemas principales donde es necesario que los distintos sectores económicos tomen acciones a favor de la reducción de las GEI y con ello contribuir a la limitación los efectos del cambio climático.

Debemos considerar que, en un efímero plazo, diversas actividades relacionadas al uso o cambio del suelo o la tierra, y las actividades forestales y agrícolas, podrían desempeñar un rol importante para reducir CO_2 presente en la atmosfera (FAO, 1999; Watson et al., 2000). Si los suelos agrícolas y bosques poseen condiciones adecuadas, estos podrían actuar como sumideros de CO_2 ; partiendo de este enfoque, fue posible identificar esta capacidad de almacenar carbono y emisiones de CO_2 , las cuales ayudan a obtener un balance adecuado para el carbono secuestrado y las aptitudes de uso del suelo (FAO, 1999). De una manera más específica, Cerda et al. (2013) señala que, una forma de aplacar el cambio climático es minimizando el contenido de CO_2 en la atmósfera a través del establecimiento de sistemas agroforestales (SAF). Los SAF consisten en incorporar árboles a un sistema de producción, los cuales poseen la capacidad de capturar el CO_2 atmosférico y almacenarlo en la biomasa subterránea, aérea y en el suelo, por largos periodos de tiempo (Cerda et al., 2013). Asimismo, los SAF al ser una alternativa de adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático, se hace necesario la

generación de una base de datos donde se incluya la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico y valor económico ambiental de estos sistemas para la toma de decisiones.

Por ello, la presente investigación se orienta en la determinación y valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en suelos de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica L.*), tomando como referencia un bosque nativo. Para esto, fue empleada la metodología del ICRAF, desarrollada en la “Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales”. Esta metodología puede aplicarse a áreas pequeñas de bosques tropicales, utilizando cálculos simples y de bajo costo.

Los resultados de esta investigación permitieron conocer el stock de carbono orgánico en suelos agroforestales de café y bosque nativo de la CC.NN. Tsachopen, permitiendo darnos una idea del servicio ambiental de almacenamiento de carbono que puede tener el distrito de Chontabamba y generar futuros proyectos que generen ingresos adicionales a los caficultores de la zona.

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
INTRODUCCIÓN	V
ÍNDICE	VII
INDICE DE TABLAS	X
INDICE DE FIGURAS	XI

CAPITULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación.	2
1.3. Formulación del problema.	3
1.3.1. Problema general.	3
1.3.2. Problemas específicos.	3
1.4. Formulación de objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Justificación de la investigación	5
1.6. Limitaciones de la investigación	6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio.	7
2.1.1. Ámbito Internacional	7
2.1.2. Ámbito Nacional	10

2.2.	Bases teórico-científicos	11
2.2.1.	Carbono orgánico del suelo (COS)	11
2.2.2.	Secuestro de Carbono del Suelo	13
2.2.3.	Efectos del Cambio Climático en el COS.	16
2.2.4.	Importancia del COS en el Marco Internacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático.	19
2.2.5.	Stock y flujos de carbono en los sistemas agroforestales.	20
2.2.6.	Almacenamiento de carbono en sistema agroforestales de café bajo sombra.	21
2.2.7.	Los cultivos y sistemas agroforestales de café.	22
2.2.8.	Los sistemas ecosistémicos.	23
2.2.9.	Valor de uso indirecto.	24
2.2.10.	Valoración económica.	25
2.2.11.	Utilidad de la valoración económica.	25
2.2.12.	Valoración económica del servicio ecosistémico de captura de carbono.	27
2.2.13.	Proceso de la valoración económica	28
2.2.14.	Métodos de valoración económica	28
2.2.15.	Ubicación de realización del estudio	29
2.3.	Definición de términos	33
2.4.	Formulación de hipótesis.	35
2.4.1.	Hipótesis general	35
2.4.2.	Hipótesis específicos	36
2.5.	Identificación de variables.	36
2.5.1.	Variable dependiente	36
2.5.2.	Variable Interviniente	37
2.5.3.	Variable independiente	37
2.6.	Operacionalización de variables.	37

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación	38
3.2.	Método de investigación.	39
3.3.	Diseño de investigación.	42
3.4.	Población y muestra.	43
3.4.1.	Población	43
3.4.2.	Muestra	43
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	44

3.5.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos para muestreo de suelo en campo	44
3.5.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos para análisis de las muestras de suelo en laboratorio y gabinete.	45
3.5.3. Técnica para la determinación de la Valoración Económica (VE)	48
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.	49
3.7. Tratamiento estadístico de datos	49
3.8. Selección, Validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.	49
3.9. Orientación ética.	50

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo y laboratorio.	51
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados	54
4.3. Prueba de hipótesis	74
4.4. Discusión de resultados	77

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ANEXO

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica SAF y bosque nativo.	30
Tabla 2. Flora más representativa de la zona.	32
Tabla 3. Tipos de depósitos de carbono de acuerdo a la GBP UTCUTS. 2014.	41
Tabla 4. Codificación del diseño experimental.	43
Tabla 5. Instrumentos de campo.	45
Tabla 6. Instrumentos de laboratorio.	46
Tabla 7. Materiales y equipos de gabinete.	47
Tabla 8. Porcentaje de materia orgánica en cada sistema de tratamiento.	55
Tabla 9. Resultados de porcentaje de carbono orgánico.	57
Tabla 10. Resultados de densidad aparente.	58
Tabla 11. Resultados del almacenamiento del carbono orgánico del suelo.	59
Tabla 12. Resultados de dióxido de carbono equivalente por sistema de tratamiento.	61
Tabla 13. Resultados de la valoración económica de los sistemas de tratamiento.	62
Tabla 14. Regresión y correlación lineal CO~COS (A Y C).	64
Tabla 15. Regresión y correlación lineal CO~COS (B Y C)	66
Tabla 16. Regresión y correlación lineal CO~COS (A y C)	68
Tabla 17. Regresión y correlación lineal DA~COS (A y C)	70
Tabla 18. Regresión y correlación lineal DA~COS (B y C)	72
Tabla 19. Regresión y correlación lineal DA~COS (A Y B).	74
Tabla 20. ANOVA de CO ₂ e entre sistemas de tratamiento.	75
Tabla 21. Prueba de Tukey del CO ₂ e al 5% entre sistemas de tratamiento.	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de parcelas por sistemas de tratamiento.	52
Figura 2. Puntos de muestreo a 3 profundidades.	52
Figura 3. Diagrama de dispersión lineal CO~COS (A y C).	63
Figura 4. Diagrama de dispersión lineal CO~COS (B y C).	65
Figura 5. Diagrama de dispersión lineal CO~COS (A y B).	67
Figura 6. Diagrama de dispersión lineal DA~COS (A y C).	69
Figura 7. Diagrama de dispersión lineal DA~COS (B y C).	71
Figura 8. Diagrama de dispersión lineal DA~COS (A y B).	73
Figura 9. Prueba de Tukey del COS entre A, B y C (alfa=5%).	76
Figura 10. Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de café y bosque nativo.	78

CAPITULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

El cambio climático está estrechamente relacionado a emisiones de GEI (especialmente CO₂) y causas antropogénicas, tales como la deforestación, quema de combustibles fósiles, y a la degradación de suelos (IPCC, 2001).

Fue pronosticado que el cambio climático seguirá afectando con mayor intensidad a países en desarrollo debido a su poca capacidad de adaptación. Así, fue introducido estrategias de mitigación y adaptación por la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) para hacer frente a este problema medioambiental. Entre las estrategias destaca la reducción de fuentes emisoras y/o aumentar sumideros de carbono. Para esto fue desarrollado el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), el cual consiste en usar el suelo y la forestería (plantaciones leñosas perennes y los SAF) (IPCC, 2001). En países como Puerto Rico, Costa Rica, Perú y Colombia (Andrade, 2008; Avilés, 2009),

usaron a la producción de café (*Coffea arabica* L.) como un sistema adecuado para instalar un SAF (Albrecht & Kandii, 2003; Montagnini & Nair, 2004; Soto-Pinto, 2010).

La producción de café es de relevancia económica a nivel mundial ya que genera empleo a alrededor de 25 millones de productores (Giovannucci & Koekoek, 2003). El Perú, está posicionado en el séptimo lugar como exportador de café mundialmente, pero ubica el segundo exportador a nivel mundial de café orgánico, solamente atrás de México. Además, el Café, como producto a exportar, a veces lidera como producto agrícola de exportación, junto a otros 10 productos principales tales como, gas natural, harina de pescado, algunos minerales, entre otros productos. El territorio peruano tiene 425,416 ha empleadas hacia el cultivo del café. Esta superficie representa solo el 6% del área agrícola nacional. El crecimiento en la producción de café es aproximadamente 2 millones de hectáreas anuales. Las mayores plantaciones de café están distribuidas en 17 regiones, 67 provincias y 338 distritos. Hoy en día, 223,482 familias forman parte de pequeños productores de café, siendo que un 95% de estos solo cuentan con 5 hectáreas o menos para su producción. Un tercio del empleo producido está relacionada a esta actividad del café, haciendo que alrededor de 2 millones de personas son dependientes a esta actividad. Un tercio del empleo agrícola está relacionado al mercado del café y 2 millones de peruanos dependen de esta actividad.

1.2. Delimitación de la investigación.

En el 2016, la provincia de Oxapampa presentaba una superficie de 10,678 hectáreas de café, siendo que 433 hectáreas se distribuían en el distrito de Chontabamba, y que, debido a sus excelentes características organolépticas, condiciones agroclimáticas, y sistema de producción son denominados cafés especiales. La producción de café en el distrito de Chontabamba es llevado a

cabo mediante la aplicación del SAF usando diversas estructuras y diferentes composiciones del dosel de sombra.

La presente investigación determinó la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico presente en el suelo y valorarlo económicamente en los sistemas de producción del cultivo de café más predominantes del distrito de Chontabamba, Provincia de Oxapampa, Departamento de Pasco.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general.

¿Cuál es la capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?

1.3.2. Problemas específicos.

- ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) – pacay (*Inga adenophylla* P.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?
- ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) – pino (*Pinus tecunumanii* F.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?
- ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?
- ¿Cuál es el valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo sistemas agroforestales de café

(*Coffea arabica* L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pacay (*Inga adenophylla* P.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.
- Determinar la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) – pino (*Pinus tecunumanii* F.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.
- Determinar la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el bosque nativo del distrito de Chontabamba, Oxapampa, Pasco – 2020.
- Valorar económicamente el servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, Oxapampa, Pasco – 2020.

1.5. Justificación de la investigación

Hoy en día, hay escasa información sobre emisiones netas relacionado a sistemas agroforestales, y sobre el contenido de carbono acumulado en la vegetación y suelo principalmente de bosques tropicales. Esto indica incertidumbre en diferentes procesos que ocurren en el cambio de uso de suelo a nivel nacional. A su vez los limitados estudios que estimaron y reportaron el potencial de acumulación de carbono en el suelo a través la composición del dosel de sombra. Por ello, el presente estudio será una contribución determinando la cantidad de CO₂ liberado en el carbono orgánico de suelo (COS), considerando la sombra generada por el dosel.

El estudio contribuirá en ofrecer conocimiento sobre la capacidad de los sistemas agroforestales cafeteros en la región de Pasco, como mitigadores de las emisiones de gases de efecto invernadero y buscar adaptarlo como alternativa al cambio climático y la importancia regional y nacional. Así mismo esta investigación contribuirá con antecedentes importantes para el avance científico, donde podrá ser utilizada como herramienta de contraste de otras investigaciones sobre el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales u otros sistemas productivos.

El resultado de la presente investigación revelará la importancia de los árboles en el área de estudio, con presencia de carbono orgánico de suelo (COS), utilizando esta información como fuente a ser entregada a los responsables locales y ciudadanos para que tomen consciencia y puedan entender la importancia de conservación de especies maderables y cumplir así la ley de conservación y protección de los bosques.

Finalmente, los resultados encontrados en este estudio llevado a cabo, permitirá generar y fortalecer conocimientos sobre los servicios ambientales aportados por los SAF, los cuales serán un requisito para establecer esquemas de pago por

servicios ambientales en el área de estudio, permitiendo así complementar algunos ingresos económicos a las comunidades rurales.

1.6. Limitaciones de la investigación

- Una de las principales limitaciones de la investigación es el tamaño de la muestra, teniendo en cuenta la dimensión del distrito, de la superficie de hectáreas del cultivo de café, de las variedades de café y sistemas de producción muy variables.
- A nivel metodológico existe mucha divergencia en la medida de la profundidad de suelo ya que el COS puede ser distribuida desigualmente a través del perfil del suelo; además, es necesario detallar protocolos específicos de trabajo para campo y establecer sistemas de muestreo eficaces para evaluar la dinámica del COS.
- Se pudo haber incluido más variables de evaluación para determinar el stock de carbono en cada sistema de producción, pero la implementación de instrumentos y equipos en los laboratorios de la universidad son escasos.
- Los trabajos de campo y laboratorio se realizaron en pandemia de COVID-19 dando lugar a restricciones en el traslado a la zona de estudio y al realizar el análisis de muestras recolectadas del suelo en el laboratorio de la universidad.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio.

2.1.1. Ámbito Internacional

Castro (2017) en la tesis titulada: “Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con *C. arabica* (L.) en la zona de los Santos, Costa Rica”, tuvo como objetivo principal determinar qué arreglo realizado mostró los mayores beneficios integrales evaluados dentro de un sistema agroforestal establecido en la Zona de los Santos. Como objetivos específicos se planteó cuantificar y comparar el carbono fijado en los diferentes componentes para cada sistema examinado, así corroborar si hubo efecto del área basal encontrado en el SAF-café sobre el carbono fijado. Con ello, fue posible estimar cuál de todos los arreglos presentó mayor rentabilidad a través de los indicadores financieros. La metodología que el autor

utiliza es un diseño completamente aleatorio, cada arreglo fue considerado como un tratamiento, el cual fue realizado con tres replicas para cada finca, así, en total fueron establecidos 12 parcelas para cada finca. Los arreglos evaluados fueron de café- Aguacate (*Persea americana*), café- poró (*Erythrina spp*), café - Gravilia (*Grevillea robusta*), y café sin sombra (testigo). Las partes evaluadas fueron el área basal y cuantificación de carbono. La materia orgánica fue computada a través del método de pérdida de peso por ignición WLOI (Weight-Loss-On-Ignition). El autor concluye que el modelo de producción de dos cultivos producidos anualmente se mostró más rentable comparado a un cultivo producido anual asociado a un cultivo de largo plazo, a pesar de que esta última recibió insumos provenientes del gobierno que se establecen siempre y cuando es manejado 156 árboles/h, y todos los sistemas son financieramente rentables. No en tanto, fue reportado la necesidad de complementar otros estudios de casos reales, que permita visualizar mejor el impacto sobre cada sistema, y así, permita determinar si la sombra mixta como manejo (varias especies de sombra) podría permitir mejorar los beneficios comparado a una sombra homogénea.

Andrade et al., (2014) estudiaron la tasa de almacenamiento y fijación del carbono en el Líbano, Tolima, Colombia, basado diferentes sistemas de producción de café: a) monocultivo; b) SAF con nogal cafetero (*Cordia alliodora*); c) sistemas agroforestales (SAF) con plátano (*Musa AAB*); y d) SAF con caucho (*Hevea brasiliensis*). Aquí fueron establecidos parcelas de muestreo con el intuito de medir el diámetro de los árboles y tallos, así, como la altura de la planta en los cafetos. Fue estimado la biomasa aérea de las plantas empleando los

modelos para el cálculo de biomasa disponibles para esta especie. Entonces, fue encontrado la tasa media de fijación de 4,37 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ para el carbono de nogal con SAF, superando ($P \leq 0,05$) al resto de los sistemas evaluados de café. Entre estos sistemas, los arboles del dosel de sombra mostraron ser el componente más importante del carbono (3,57 y 1,20 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ para el nogal y caucho, respectivamente). El SAF aplicado a los diferentes cultivos mostro los siguientes almacenamientos de carbono: con nogal (36,7 Mg·ha⁻¹ en 8,4 años), con caucho (22,9 Mg·ha⁻¹ en 14,6 años), con plátano (1,3 Mg·ha⁻¹ en 2,1 años) y con cafeto en monocultivo (2,2 Mg·ha⁻¹ en 3,5 años). Además, máxima fijación fue observado en los SAF que proyectaron un nivel de sombra de 33%, indicando el potencial de estos sistemas de producción para tomar en consideración para futuros proyectos como sumideros de carbono.

Corral (2006), determinó el carbono almacenado y fijado en sistemas silvoagrícolas de cacao y café. Asimismo, estimaron el valor económico de este servicio ambiental para ambos fijación y almacenamiento. La investigación fue realizada en: las zonas de Caluma (Bolívar) y Pichilingue (Los Ríos), a través de tres SAF con cacao: *T.cacao* + *Inga edulis*, *T.cacao* + *Schizolobium parahyba* y *T.cacao* + *Cordia alliodora*; con café: *C.arabica* + *Inga edulis*, *C.arabica* + *Schizolobium parahyba*, *C.arabica* + *Cordia alliodora*, todos con la edad de 6,5 años. Los resultados encontrados mostraron un almacenamiento de 115 y 121 t/ha para cacao y café de carbono en la biomasa de los SAF, respectivamente. Estos encuentros fueron similares a los reportados en la captura de carbono de bosques secundarios del trópico. Para el café, la fijación de potencial de carbono (biomasa aérea + suelo) en los SAF

presentaron un valor de 187,5 t/ha, mientras en el cacao 196,7 t C/ha. Concluye que, la importante fijación de carbono encontrado debería tomarse en consideración para realizar planes de pago por servicios ambientales basado en el constante flujo de biomasa encontrado en los arbustos y árboles como componente de cada sistema.

2.1.2. Ámbito Nacional

Salazar (2018) estudió cómo la edad influenciaba sobre los sistemas agroforestales (SAF) del café está relacionado al almacenamiento de carbono, en los suelos de dos distritos de Longar y Mariscal Benavides, ubicados en la provincia de Rodríguez de Mendoza, Amazonas – Perú. Para ello, se propuso investigar 2 sistemas: a) SAF de 8-10 años ubicado en el distrito de Mariscal Benavides; y b) SAF de 3-5 años ubicado en el distrito de Longar. Dicha evaluación fue realizada a través de 12 calicatas, de los cuales muestras de suelo fueron recolectados a diferentes profundidades (0 -15, 15 - 30 y 30 - 45 cm). En total 36 muestras fueron analizados su densidad aparente y contenido de carbono. Se encontraron que el SAF en siembra de café + guaba y edad de 3 a 5 años logro almacenar más cantidad de carbono (224,26 Tm de C/ha) comparada a aquel solo con siembra de café de 8 a 10 años (198,95 Tm C/ha). Además, fue reportado que mayor cantidad de carbono se concentra almacenado en los primeros 15 cm de profundidad del suelo y que los SAF de mayor edad representan mayor valor económico.

Odar (2018), investigó el almacenamiento de carbono en el anexo de Vilaya (distrito de Colcamar, provincia de Luya) en Amazonas sobre sistemas agroforestales de café (*Coffea* spp.). El trabajo examinó el porcentaje de carbono presente en suelo de policultivos de café y diversos árboles de sombra en varios terrenos teniendo pashaco (*Schizolobium*

spp.), café (*Coffea* spp.), y guaba (*Inga* spp.). Cuatro componentes de almacenamiento fueron tomados en consideración: suelo, biomasa hojarasca, maleza, y aérea viva (árboles y café). La biomasa fue estimada a través del método directo mediante la fragmentación, peso húmedo, seco y peso de cada uno de sus componentes. Para el café, fue establecido una ecuación alométrica: $B(\text{kg}) = 14.928 - 5.319(\text{DAP}) + 0.598(\text{DAP})^2 - 0.019(\text{DAP})^3$, que relaciona el diámetro de la planta, la biomasa aérea seca, usando un coeficiente de determinación de 0.947. Los resultados mostraron que los sistemas de café-guaba-pashaco acumularon 26.922 tn C/ha, y café- guaba, 16.305 tn C/ha en la biomasa aérea. Además, fue observado una alta correlación significativa entre el porcentaje de nitrógeno y carbono del suelo ($r = 0.989$). En adición, fue reportado que los sistemas de café-guaba-pashaco y café-guaba en sus sistemas presentaron un porcentaje del 2.58 y 2.51% de carbono en el suelo, respectivamente.

2.2. Bases teórico-científicos

2.2.1. Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) representa una minúscula parte del ciclo global del carbono, implicando su ingreso básicamente a través del suelo, el océano, la vegetación, y la atmósfera. Fue estimado que la reserva de COS logra almacenar alrededor de 1500 PgC en el primer metro de suelo, lo que indica más presencia de carbono a comparación de la atmósfera (aproximadamente 800 PgC) y vegetación terrestre (500 PgC) (FAO y GTIS, 2015). Este extraordinario reservorio de COS no es estático, sino que está constantemente circulando entre las diferentes reservas mundiales de carbono en formas moleculares diversas (Kane, 2015).

El CH₄ (metano) y CO₂ (dióxido de carbono) son los dos principales gases atmosféricos compuestos de carbono, algunos organismos autótrofos (ejemplo plantas), y microbios fotoquimioautótrofos logran sintetizar este CO₂ en material orgánico. Este material orgánico obtenido (forma de residuos vegetales y exudados) son nuevamente reincorporados al suelo para la fauna, así ofrecer carbono que favorece a los suelos para la nitrificación de diferentes plantas. Además, esta transformación a materiales orgánicos proporciona una mezcla biogeoquímica compleja que ofrecerá nutrientes y minerales a través de la descomposición microbiana realizada en diferentes etapas de descomposición (Von Lützow, 2006; Paul, 2014). Además, estos nutrientes también pueden asociarse con minerales del suelo haciéndose más ricos dentro de agregados, permitiendo su acumulación y persistencia de COS durante décadas, siglos o incluso milenios dentro del suelo (Schmidt et al., 2011). El CO₂ confinado inicialmente regresa a la atmósfera después que la materia orgánica del suelo (MOS) se descompone (o mineralizada) por microorganismos. Otra forma de perder el carbono es a través de los exudados radiculares (ejemplo, ácido oxálico) que emite compuestos orgánicos después de asociarse con minerales (Keiluweit et al., 2015). Finalmente, el carbono puede ser liberado también de los suelos hacia océanos y ríos en forma de carbono orgánico disuelto (COD) o a través de la erosión de este material.

En inicio, la cantidad de COS acumulada en un determinado suelo va a depender del equilibrio de entrada y salida del C en forma gaseosa a través de la respiración del suelo como producto de la lixiviación y mineralización microbiana como COD. Además, el C local puede ganarse o perderse mediante la erosión o deposición del suelo, el cual redistribuye el C presente a escala local, nivel paisajístico o regional. Así, niveles de

CO₂ almacenados pueden ser controlados si se gestiona adecuadamente la cantidad y el tipo de residuos orgánicos ingresantes al suelo (aporte de C orgánico al sistema del suelo) y reduciendo las pérdidas de C del suelo (FAO Y GTIS, 2015).

Entre los factores controladores para descomponer la MOS se encuentran el contenido de agua y temperatura del suelo (basado en las condiciones climáticas), que intervienen bastante para el almacenamiento del C del suelo debido a su influencia sobre la actividad microbiana. Además, la comunidad microbiana (relación hongos - bacterias) y su composición también podrían influenciar sobre la descomposición relacionada a ciertos compuestos. La recalcificación química de complejas moléculas aparentemente acumula COS tales como la lignina o los lípidos, los cuales no contribuyen primordialmente la persistencia del MOS sobre el suelo (Thévenot et al., 2010; Marschner et al., 2008). La MOS y su persistencia está directamente influenciada por la estabilización del COS del suelo mediante la asociación e interacción con los minerales presentes en los suelos (Schmidt et al., 2011).

2.2.2. Secuestro de Carbono del Suelo

Es el proceso basado en que el carbono es fijado desde la atmósfera por medio de los residuos orgánicos, las plantas para después almacenarse en el suelo. Con relación al CO₂, la captura (secuestro) del COS ocurre en tres etapas: i) la extracción del CO₂ de la atmósfera por medio de la fotosíntesis; ii) la transferencia del C del CO₂ hacia la biomasa vegetal; y iii) transferencia del C de la biomasa vegetal hacia el suelo donde es almacenado en forma de COS (reserva más lábil). Esta reserva es caracterizada debido a su mayor tasa de rotación (pocos años o días) que engloba a los residuos que recién se incorporan, pero pueden

descomponerse rápidamente por la fauna del suelo, incitando usualmente a emisiones de CO₂ para la atmósfera. Además, la planificación clave en las medidas de secuestro de COS necesita ser visto más allá de la captación de CO₂ atmosférico, y necesita encontrar nuevas formas de retener C en la reserva lenta de COS. En controversia, el estudio presenta que la reserva estable posee un mínimo potencial para el secuestro de C como consecuencia de su resistencia al cambio y, así, su falta de respuesta relacionado a la gestión (Kane, 2015).

El carbono recién adicionado podría estabilizarse en el suelo a través de diversos mecanismos (Six et al., 2006; Jastrow et al., 2007; Kane, 2015). Físicamente, el C alcanza la estabilización mediante su aislamiento dentro de los macro y micro agregados presentes del suelo, lugar inaccesible para organismos del suelo. Químicamente, el C es absorbible por medio de las arcillas y enlaces que podrían obstruir el consumo de C por los organismos. Bioquímicamente, el C puede ser re-sintetizado a través de estructuras de moléculas complejas que podrían impedir la descomposición. Todos estos mecanismos son dependientes de una variedad de factores abióticos, bióticos y la forma de gestionar, el cual determina la eficacia para estabilizar el C en el suelo (Six et al., 2006; Kane, 2015).

La saturación de C en el suelo se refiere a que la reserva de C del suelo ha logrado su máxima capacidad de carga para conseguir almacenar insumos del C del suelo (Six et al., 2002, Stewart et al., 2007). Este umbral es dependiente de diversos factores tales como las propiedades dinámicas e inherentes del suelo y sus interacciones que ocurren con factores abióticos. En la literatura, es conocida también como la estabilización de capacidad máxima del carbono (Beare et al., 2014). Se

logra deducir que las curvas estabilizadoras del C en el suelo no se incrementan infinitamente, y que cuando consigue el nivel máximo de saturación del C, la adherencia de COS termina, y los suelos pierden la propiedad de actuar como sumideros de C neto, pasando a convertirse en una fuente de C neto. Por lo tanto, el secuestro de COS posee limitaciones temporales y espaciales con características de proceso reversible (Paustian et al., 2016). Suelos que no poseen COS tienen potencial mayor para obtener C, pero, con menor propensión de hacerlo. Debido a que la mayoría de los suelos mundialmente se encuentran lejos de sus umbrales de saturación, hay un inmenso potencial y espacio para los insumos de C, para la gestión de protección de las reservas que existen para buscar la maximización en el secuestro de C en el suelo (Kane, 2015).

Por lo general, el ciclo del C y su secuestro son más favorables en los horizontes superficiales del suelo. En adición, el carbono es estabilizado en tiempos de rotación más largos lo cual conforma una mayor proporción del COS total reportado hacia horizontes profundos del suelo (Trumbore, 2009; Rumpel et al., 2012). Beare et al., (2014) comentaron que, a una mayor profundidad, los suelos poseen mayores capacidades de almacenar C comparado con capas más superficiales. Esto como consecuencia a grande diferencia entre la cantidad de COS existente relacionado al valor de saturación de este. El almacenamiento de C estabilizado por grandes periodos de tiempos de residencia en los horizontes más profundos del suelo esta atribuido a la inmovilización temporal, al transporte continuo, y al procesamiento microbiano de COD internamente del perfil del suelo (Kaiser & Kalbitz, 2012) y/o mediante la estabilización adecuada de la materia orgánica, que deriva de la raíz a la matriz del suelo (Rasse et al., 2005). Lorenz & Lal (2005) acentuaron que

los subsuelos poseen el potencial de almacenar de 760-1520 Pg de C adicional.

Al mismo tiempo, fue señalado que se debe tener cuidado al momento de adicionar nuevas fuentes de C los subsuelos porque podría representar riesgo en el incremento de mineralización de los COS existentes. No en tanto, el incremento de las reservas de COS presentes en el subsuelo sigue siendo considerado como un medio prometedor que permita secuestrar sustancialmente el C en los suelos (Rumpel et al., 2012).

2.2.3. Efectos del Cambio Climático en el COS.

Las prudencias actuales recomiendan que la respuesta del C del suelo en relación al cambio climático inicia desde minúsculas pérdidas hasta moderadas ganancias. Predecir los posibles efectos relacionados al cambio climático en los suelos es extremadamente difícil de llevarlo a cabo, esto debido a las diversas interacciones complejas entre la humedad, temperatura, incremento de la productividad, de la descomposición, variaciones debido a las regiones y diversos tipos de suelo (FAO Y GTIS, 2015).

2.2.3.1. Efectos del Incremento de Temperatura y Precipitación sobre reservas de COS.

La precipitación y temperatura son considerados como las variables más importantes para controlar la dinámica de los COS (Deb et al., 2015). Si la temperatura es incrementada, la producción vegetal también debe incrementarse, y como consecuencia los aportes de C al suelo, también tenderá a incrementarse a través de la descomposición microbiana (Keestrea et al., 2016). Existe un fuerte soporte empírico que si la temperatura es incrementada, este estimulara a la pérdida de C

del suelo liberándose a la atmosfera, el cual conlleva a una positiva retroalimentación del ciclo C terrestre que impulsaría al cambio climático (Crowther et al., 2016).

Asimismo, si ocurre el cambio climático, se predicen la llegada de fenómenos extremos en precipitación y sequía que podrían tener fuertes impactos en la dinámica de cada ecosistema los cuales en forma singular o combinados incrementarían la temperatura y el CO₂ (IPCC, 2014). Estos eventos extremos y su frecuencia podrían exacerbar susceptibilidad a la erosión, la salinización y otros procesos de degradación, lo que conduciría a nuevas pérdidas de C. Finalmente, el cambio climático podría afectar seriamente a diversos factores formadores de suelos, que incluye la temperatura, lluvia, vegetación, microorganismos/biota, afectando la tasa de acumulación de COS de forma negativa (FAO Y GTIS, 2015).

2.2.3.2. Efectos del Aumento de la Concentración de CO₂ en la atmósfera

El incremento de CO₂ atmosférico antropogénico puede generar una grande productividad primaria neta (PPN), representando así este el principal insumo de C al suelo, siempre y cuando no se encuentren limitaciones en agua y nutrientes.

Es esperado que este incremento en el PPN impulse el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero en último motivo, podría conducir hacia una retroalimentación negativa del CO₂ atmosférico mediante más grandes aportes de COS (Van Groenigen et al., 2014; Amundson et al., 2015). De otra manera, la teoría de la progresiva limitación de los nutrientes enuncia que

el PPN al CO₂ elevado serán dependientes a la adición de nutrientes al suelo, particularmente N. Aun no hay claridad, que si es incrementado la cantidad de PPN estos serán traducidos a la capacidad de mayor almacenamiento de COS. Estudios realizados sobre enriquecimiento de CO₂ en aire libre, usualmente no encontraron cambios en el contenido de COS a pesar del aumento de la PPN. Este posible incremento de las tasas de pérdida de los insumos de C o incremento la descomposición del COS mediante el efecto impulsor.

Y para finalizar, los COS acumulados bajo niveles elevados de CO₂ tienden a ser difíciles de medir debido a la heterogeneidad espacial en las reservas de COS. La corta escala temporal de los experimentos está relacionada a los tiempos de rotación del COS (Todd-Brown et al., 2014).

2.2.3.3. Incertidumbres sobre la respuesta del COS al cambio climático

En la actualidad, existen innúmeras incertidumbres intentando realizar previsiones del comportamiento del COS, en función del cambio climático. Así, las diversas consecuencias provocado por acciones humanas relacionado al clima global son aún inciertas, esto debido a la limitada comprensión de la respiración del suelo, y a la forma de representar los modelos del sistema terrestre (Gougoulias et al., 2014). Por ejemplo, altas incertidumbres son ligados al llamado “efecto impulsor” donde la descomposición de la MOS. Esto porque el MOS es un proceso crucial durante el balance de C presente en el ecosistema. Este efecto impulsor se refiere al incremento de la descomposición de las reservas de

COS en respuesta a la adición de compuestos que se degradan con facilidad (Van der Wal & Boer, 2017). Este efecto adiciona incertidumbre a los futuros pronósticos del C presente en el suelo debido a un cambiante clima y sus diversos mecanismos que aún no son entendidos completamente (FAO Y GTIS, 2015). Como descritos por Gougoulas et al., (2014), los organismos microbianos aportan sobre al cambio climático mediante la retroalimentación que ocurre en el ciclo del carbono, el cual no es sencillo, debido a que estos adicionan mayor incertidumbre como consecuencia a efectos indirectos, directos o simultáneos. Así, estas interacciones con otros factores generan demasiadas interrogantes que aún permanecen sin respuesta, y relacionándolo al tiempo necesario para que efectos de incremento de temperatura sean combatidos, y tener una idea del tiempo necesario por las comunidades del suelo a adaptarse en lugares más cálidos (Crowther et al., 2016).

2.2.4. Importancia del COS en el Marco Internacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático.

Desde los 1980s, el cambio climático ha sido centro de atención en diferentes acuerdos internacionales. En estos acuerdos el suelo siempre fue considerado como el componente que abarca o mantiene una mayor cantidad de carbono en la Tierra. Basado en el Acuerdo de París y la Convención Marco de las Naciones Unidas, las futuras emisiones de GEI presente en los suelos deberían de ser más estudiados para poder tener mejor una opinión más clara sobre los inventarios. Por ello, es indispensable, conocer bien las reservas actuales y globales de los COS, así como de su distribución espacial a fin de explicar los actores presentes

(por ejemplo, responsables políticos, agricultores, y usuarios de la tierra) para que estos tomen conciencia y usen óptimamente las tierras disponibles, y ofrecer oportunidades claras de adaptación y mitigación frente al cambio climático, pero sin dañar el suministro del agua y fornecimiento de alimentos (FAO, 2017).

2.2.5. Stock y flujos de carbono en los sistemas agroforestales.

Se conoce que los sistemas agroforestales, representan los más grandes sumideros de CO₂, esto debido a que consiguen retener aproximadamente 95 tn C en promedio, lo que mitiga el problema del cambio climático. Además, genera bienes y servicios, lo que intenta concientizar para evitar incurrir que se practique la deforestación (Isaza & Cornejo, 2015). Esto porque los arboles representan la base de estos sistemas que son claves para la realización del ciclo del carbono. Cuando la planta empieza a crecer, este va acumulando progresivamente CO₂, el cual es convertido en biomasa (Corral et al., 2006). Fue estimado que una superficie entre 585 a 1 215 millones de hectáreas manejado agroforestalmente posee la capacidad de capturar y almacenar de 1.1 a 2.2 Pg de C, en suelos y vegetación por un tiempo aproximado de 50 años (Dixon, 1995) y también fue precedido que los 400 millones de hectáreas que existían en el año 2004 bajo sistemas agroforestales poseían el potencial para retener C con tendencia a futuro de 1 millón de toneladas hacia el año 2040 (Montagnini & Nair, 2004).

Así, la transformación de los bosques e integración de las diversas actividades agrícolas, lo que usualmente ocurre con varios sistemas agroforestales, contribuyen con alrededor del 20% de las emisiones en relación con el C presente mundialmente (Parry et al., 2007). Estas emisiones fueron establecidas básicamente por diferentes materiales que

se descomponen y se encuentran dentro del sistema (Gibbs et al., 2007), y también por el empleo de ciertos abonos (Umaña & Pulgarín, 2013). Adicionalmente, el empleo de árboles no adecuados para sembrar plantaciones con fertilizantes, impulsan la producción de gases relacionado al efecto invernadero (Beer et al., 1998).

2.2.6. Almacenamiento de carbono en sistema agroforestales de café bajo sombra.

Similar a los sistemas agroforestales que utilizan componentes leñosos, agroecosistemas cafetaleros bajo sombra también aportan en la reducción o mitigación de C hacia la atmósfera y su almacenamiento en tierra (Polzot 2004). Por ejemplo, Fournier, citado por Polzot (2004) realizó un trabajo en la Ciudad Colón, Costa Rica, y reportó que una finca de café bajo sombra utilizando árboles de sombra (*Erythrina poeppigiana*) retuvo 198 t C ha⁻¹, en todos los componentes de la superficie (suelo, hojarasca, y raíces). Asimismo, en otro estudio que emplearon sistemas de producción de café de sombra, fueron encontrados el almacenamiento de 195 t C ha⁻¹, los cuales fueron cultivados en café bajo la sombra de *Erythrina poeppigiana*, y 168,74 t C ha⁻¹ bajo *Eucalyptus deglupta* (Ávila, 2000). Por último, en Nicaragua, Suárez (2002) en un trabajo realizado en diversas fincas de café y diversos tipos de árboles de sombra reportó un rango en el almacenamiento de C de 144,7 t C ha⁻¹ a 166,7 t C ha⁻¹. Además, este mismo trabajo, reportó que 75 a 97 % del C retenido en las fincas examinadas en el suelo, reside de 5,6 a 14%, y en los árboles de sombra de 2,3 a 3,9% en la hojarasca, y 0,1 a 1,5% en los arbustos de café.

2.2.7. Los cultivos y sistemas agroforestales de café.

Los países con mayor producción de café siguen el siguiente orden: Brasil (34.4%) > Vietnam (16.9%) > Indonesia (8.8%) > Colombia (6.7%) > Perú (3%) > México (2.9%), (ICC, 2014). Mundialmente el café es producido en aproximadamente 13.2 millones de km² (Cardenas, 2007). Entre las especies mayormente producidas debido a su importancia comercial son: la robusta (*Coffea canephora*) y el arábigo (*Coffea arabica*), con 63% y 37%, respectivamente (Jiménez & Massa, 2015). En el Perú, el café pergamino (*Coffea arabica*) es el café más producido con alrededor de 21 000 toneladas reportada entre enero-marzo del año 2016 (MINAGRI, 2016).

De acuerdo a la Organización Internacional de Café (ICO), para el 2015, el consumo mundial de café estuvo alrededor de 152.1 millones de sacos (60 kg de peso) representando un incremento comparado a los 150.3 millones del 2014. Basado en estos incrementos, fue previsto una tasa de crecimiento de 2% anual, el cual también mostro un incremento de producción en las áreas de cultivo (ICO, 2016).

El café usualmente fue cultivado bajo la sombra de los árboles en sistemas agroforestales de complejidad (Jezeer & Verweij, 2015). En gran parte de países latinoamericanos no tiene infraestructuras adecuadas para riego, dependiendo básicamente de las lluvias (Isaza & Cornejo, 2015). Frente a esta disyuntiva, la sombra creada para el café cultivado muestra un contrapeso beneficioso, ya que generara excelentes aportes ecológicos y productivos (Guzmán, 2016). No en tanto, la ICO, reconoce que la industria cafetalera debe contrarrestar problemas relacionados al cambio climático (ICO, 2016).

Los sistemas agroforestales de café, en relación al concepto de la Convención Marco de las Naciones Unidas, son sistemas de cultivo

ambientalmente amigables por su capacidad de fijación de carbono (Soto-Pinto, 2010), que se da porque son cultivos perennes y mantienen un manejo adecuado (Espinoza et al., 2012). Esta acumulación es consecuente en sistemas con árboles de sombra (Andrade et al., 2014). La planificación de incorporar árboles es una forma de desarrollo limpio, que puede ser insertado mediante bonos solidarios de C en estos tipos de sistemas (Orozco et al., 2014) y así podrían aportar en la fijación de C atmosférico hacia los suelos (Alvarado et al., 2013).

2.2.8. Los sistemas ecosistémicos.

Los servicios ecosistémicos son reconocidos por su aporte como beneficios sociales, económicos y ambientales, que directa o indirectamente las personas obtienen de los ecosistemas. Estos sistemas están representados principalmente por el mantenimiento de la biodiversidad, en las cuencas la regulación hídrica, la retención de carbono, fornecimiento de recursos genéticos, la belleza paisajística, y formación de suelos, entre otros (Ley n.º 30215, “Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos”).

El Millenium Ecosystem Assessment, sostiene que los servicios ecosistémicos se clasifican en cuatro tipos:

- Servicios de provisión: Beneficios ganados de los bienes y servicios que la comunidad percibe de los ecosistemas, por ejemplo: materia prima, alimentos, recursos genéticos, agua fresca, entre otros.
- Servicios de regulación: Beneficios obtenidos si se regula los procesos ecosistémicos como, por ejemplo: regulación del clima, calidad del aire, erosión del suelo, entre otros.

- Servicios culturales: beneficios no materiales ganados por las personas como retribución de los ecosistemas, por ejemplo: experiencia espiritual, información para generar conocimiento la belleza escénica, turismo y recreación, cultura inspiradora, y arte y diseño.
- Servicios de soporte: asocia a todos los servicios esenciales para generar otros servicios ecosistémicos, como ejemplo la producción primaria, formación de suelos, y ciclo de nutrientes.

2.2.9. Valor de uso indirecto.

El valor de uso indirecto o de uso funcional nace de los servicios proporcionados por el medio ambiente provee. Por ejemplo, los humedales conocidos como pantanos o turberas cubiertas de agua superficial o de extensiones marismas, que son usualmente empleados para pesca, o actividades recreativas o navegación, producen funciones ambientales necesarias para el ecosistema controlando las crecidas o desbordes de ríos, filtrando los nutrientes, captando y recargando acuíferos y nutrientes, ofreciendo también protección a la biodiversidad, etc. Cuantificar el valor de uso indirecto, es frecuentemente algo complicado a realizar comparado al uso directo. Las “cantidades” de servicios proporcionado son complicados de cuantificar y gran parte de estos servicios no posee mercado, es así que, su “precio” es casi imposible de establecerse. Los servicios estéticos o visuales basado en un paisaje, son conocidos como bienes públicos, lo que significa pueden ser disfrutados por cualquier persona sin afectar a otras personas (consumo no rival).

2.2.10. Valoración económica.

Siguiendo al MINAM, la valoración económica ambiental es una herramienta aplicada para cuantificar, en términos económicos, qué valor poseen los bienes y servicios ecosistémicos de forma independiente de que estos tengan o no tengan precio en el mercado.

León (2007) sustentó que la valoración económica puede ser dividido en función a su valor o no valor de uso. Así, el valor de uso se divide en uso de opción, directo o indirecto, y el valor de no uso es valorado en función a su legado y existencia. La captura de carbono está clasificada como un uso indirecto valorizado.

Hoy en día, la valoración económica está dentro de los estudios de impacto ambiental llevada a cabo por diversas consultorías. Los costos conseguidos son entonces adicionados al costo total de los proyectos.

2.2.11. Utilidad de la valoración económica.

La información encontrada como respuesta a la valoración económica puede ser aplicada para tomar decisiones adecuadas en fines diversos (MINAM, 2013):

- Aumentar la conciencia ambiental: Poner estos términos en forma monetaria de beneficios ofrecidos por los servicios de los ecosistemas se da mediante la valoración económica, proporciona mayor conciencia ambiental sobre la sociedad y la importancia de conservar los ecosistemas para mejorar el bienestar actual y futura de la sociedad.
- Análisis costo-beneficio: La respuesta encontrada de la valoración económica podrían ser añadidas al análisis costo-beneficio (ACB),

con el intuito de seleccionar y proponer mejores opciones políticas o proyectos buscando el bienestar social.

- Planificación y diseño de políticas: Esta valoración económica del patrimonio natural viabiliza destacar beneficios económicos para el uso sostenible, de conserva, o que perdidas podría ocasionar su degradación. Así, este instrumento se torna primordial para diseñar políticas ambientales, integrando los servicios ecosistémicos durante el plan para el desarrollo en todos los ámbitos.
- Regulación ambiental: Esta valoración económica agrega información puntual para diseñar nuevos instrumentos para regular el medio ambiente, por medio de desincentivos o incentivos. Estos generarían cambios comportacionales en diferentes agentes financieros buscando una calidad del ambiente deseado a nivel social.
- Mecanismos de financiamiento: puede emplearse para estructurar diversos mecanismos para financiar incentivos económicos o ambiental siguiendo la conservación del patrimonio natural y los ecosistemas. Aquí se encuentran, los Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MRSE), los Fondos de Agua, y Acuerdos por Conservación, entre otros.
- Contabilidad nacional: Este apoya en reconocer el valor de flujo monetario relacionado al patrimonio natural, el cual serviría para elaborar cuentas ambientales nacionales.

2.2.12. Valoración económica del servicio ecosistémico de captura de carbono.

Como detallado en líneas previas, la valoración económica es computado en base a un valor dado a un objeto (ejemplo servicio ambiental), que puede ser social o ambiental; para este estudio ambiental ya que este servicio proviene de la naturaleza.

Tal comprende diversas etapas que ingresan secuencialmente, por un lado, conocer cuantitativamente la biomasa de un depósito de carbono determinado, su *stock* de carbono, estimar su valor ambiental; y por otro lado, la disponibilidad para pagar por ese servicio por parte de las personas.

A nivel político, la valoración económica es computada por tonelada de CO₂ liberado hacia la atmósfera. Hoy en día, se han encontrado diversas opiniones buscando establecer un precio para la valoración económica del servicio de captura de C/tn CO₂ equivalente (CO₂e) que sea liberado o fijado, hacia el C como mercado. Por ejemplo; (a) El Reino Unido mediante su Ministerio (9.55 euros y 18.08 euros para el 2014 y 2016, respectivamente) (Ares, 2014); (b) USD 48 por la Administración de los Estados Unidos de Norteamérica (Climate Progress, 2013); (c) USD 40 por la empresa Royal Dutch Shell, buscando impulsar una energía menos contaminante que el C comparado al gas (Climate Progress, 2013). Es importante recalcar la relación impuesto – emisión de CO₂ mostró precedentes positivos. Por ejemplo, la actual inexistencia del impuesto de 23 dólares australiano/ton CO₂ liberado en Australia en años hasta el 2012 demostraron que las emisiones fueron mermadas en 9% para el sector energético (TCK, 2014). Su eliminación por el ministro Tony Abbott fue mal vista debido a que era una buena iniciativa y ejemplo para disminuir los niveles del CO₂ en la atmósfera (INNIS, 2014).

Al final, se instala un reto que es diseñar un modelo financiamiento inteligente que inste en balancear la inversión económica relacionado a los beneficios ambientales (León, 2007).

2.2.13. Proceso de la valoración económica

Las políticas, programas, proyectos o actividades implementadas o desarrolladas por los agentes económicos generan cambios en los bienes y servicios ecosistémicos que conforman el patrimonio natural afectando, positiva (mejora de la calidad ambiental) o negativamente (empeoramiento de la calidad ambiental), el bienestar individual y social. Para determinar si las decisiones que se toman sobre el patrimonio natural son o no beneficiosos para la sociedad, una herramienta (entre otras) que se podría utilizar es la valoración económica (MINAM, 2013).

En el proceso de valoración económica, se toma como punto de partida la identificación del problema, de donde se generan propuestas de políticas, programas, etc. Dichas propuestas producen cambios en los bienes y servicios ecosistémicos, los cuales afectan el bienestar de los individuos y la sociedad y se traducen en valores económicos. Finalmente, esta información puede ser utilizada en la toma de decisiones (MINAM, 2013).

2.2.14. Métodos de valoración económica

Se han desarrollado diversos métodos de valoración económica con el objeto de cuantificar de forma parcial o integral el valor económico de un bien o servicio ecosistémico. La elección del método de valoración depende generalmente del objetivo de la valoración, la información disponible, el bien o servicio ecosistémico, el tipo de valor económico, los recursos financieros, el tiempo, entre otros. Los principales métodos de

valoración económica de los servicios de los ecosistemas se muestran a continuación (MINAM, 2016):

- Métodos basados en valores de mercado.
 - Precios de mercado.
- Métodos basados en preferencias reveladas.
 - Cambios en la productividad (MCP).
 - Costo de Viaje (MCV).
 - Precios Hedónicos (MPH).
 - Costos Evitados (MCE).
- Métodos basados en preferencias declaradas.
 - Valoración Contingente (MVC).
 - Experimentos de Elección (MEE).
- Otros enfoques de valoración económica.
 - Transferencia de Beneficios (TB)

2.2.15. Ubicación de realización del estudio

El área de investigación se ubica en el centro del Perú, en la región Pasco, provincia de Oxapampa, distrito de Chontabamba, CC.NN. Tsachopen. Los SAF (café – pino y café – pacay) se encuentran en el kilómetro 7 del tramo Puente Villar – Tsachopen - Gramazú de la Red Vecinal del distrito de Chontabamba, exactamente en la Finca “La Florida” cuyo propietario es el Sr. Nicanor Máximo García Ortiz y forma parte del Programa de producción orgánica, sostenible, comercio justo de la Cooperativa Agraria Cafetalera CEPRO Yanasha. Por otro lado, el área del bosque nativo se encuentra al sureste del fundo como pueden observarse en el Anexo 3(3.1): Mapa de Ubicación de los sistemas agroforestales de café y bosque

primario. Ambas áreas de investigación están ubicadas geográficamente como se muestra en la tabla N° 1.

Para la determinación del área de estudio, se seleccionaron dos (02) criterios que se muestran a continuación.

- **Accesibilidad:** El acceso al tramo Puente Villar – Tsachopen - Gramazú es predominantemente terrestre. El viaje toma aproximadamente 15 a 20 min desde la ciudad de Oxapampa.
- **Situación geográfica:** Zonas con similares prácticas de manejo agronómico (cultivo asociado), microclima, relieve (gradiente de inclinación), fisiografía (moderado o altamente accidentado), tipo de vegetación (especies de árboles asociados al café y especies nativas) y fertilización (orgánico o sintético).

Tabla 1. Ubicación geográfica SAF y bosque nativo.

Sistemas	Coordenadas UTM		Altitud
	E	N	
SAF café – pacay (A)	451181.1	8836215.6	Entre 1794 - 1799
SAF café – pino (B)	451061.8	8836216.9	
Bosque Nativo (C)	450555	8834903	1987

Fuente: Elaboración propia.

A. Clima

De acuerdo a los datos meteorológicos, la precipitación y temperatura anual promedio de la zona de estudio es de 1,500 mm y 16°C, respectivamente.

Asimismo, el clima característico es particularmente Tipo Climático B(r) B´1 H3, esencialmente consiste en un clima lluvioso (B) y semi

cálido (B´) con precipitación abundante en todas las estaciones (r), y húmedo (H3).

Por otro lado, según la Guía Explicativa del Mapa Ecológico del Perú, la zona de estudio está definido como: bmh-MBT (Bosque muy húmedo – Montano Bajo Tropical), ubicado en la región latitudinal tropical del país.

B. Hidrología

La red hidrográfica de la provincia está formada por las Cuencas del río Pachitea y Perené, encontrándose el área de estudio en la Microcuenca hidrográfica del río Chorobamba.

C. Fisiografía

La vegetación del área de investigación se desarrolla sobre terrenos con fisiografía regularmente accidentada por laderas moderadamente empinadas a sus flancos propios de la selva alta.

D. Flora

Se caracteriza por una vegetación densa presenta una estructura vertical organizada en múltiples estratos. Por lo general son suelos susceptibles a la erosión sin embargo posee una gran cantidad de endemismos de especies vegetales.

Algunas plantas (hierbas, arbustos y árboles) que son características de esta zona se mencionan a continuación:

Tabla 2. Flora más representativa de la zona.

Flora más representativa (Familia)
Melastomataceae, Asteraceae, Myrsinaceae, Lauraceae, Cunoniaceae, Alstroemeriaceae, Cyperaceae, Campanulaceae, Aquifoliaceae, Ericaceae, Myrtaceae, Guttiferae, Teaceae, Araliaceae, Begoniaceae, Fabaceae, Heliconiaceae, Passifloraceae, Piperaceae, Rutaceae, Moraceae, Poaceae, Orchidaceae, Bromeliaceae, Cunoniaceae, Aspleniaceae, Lauraceae, Podocarpaceae, Rubiaceae, Clusiaceae, Bignonaceae, Juglandaceae, entre otros.

Fuente: Plan Maestro 2005-2009. Parque Nacional Yanachaga Chemillén.

E. Fauna

La fauna característica está compuesta por especímenes de selva alta y selva baja, tales como el puma (*Felis concolor*), mono choro (*Lagothrix lagotricha*), el “tunqui” o gallito de las rocas (*Rupícola peruviana*), roedores como el majaz o liebre (*Agouti paca*), y las diversas especies de cutpe o misho (*Dasyprocta sp.*).

– Fauna del suelo

Está comprendida generalmente de lombrices, hormigas, coleópteros, arañas y grillos.

F. Actividades económicas

La principal actividad del distrito de Chontabamba considerada como Alimentador del Corredor Logístico 17: La Oroya – Tarma – La Merced – Satipo, es la agricultura. Este corredor es de importancia el cual

permite la comercialización de productos agrícolas como granadilla, zapallo, café, rocoto y maíz amarillo; además de ganado vacuno y madera aserrada procedente de plantaciones forestales como pino y eucalipto.

2.3. Definición de términos

- **Almacenamiento de carbono:** consiste en someter al CO₂ a un ambiente subterráneo dentro de formaciones geológicas adecuadas con miras de encontrar permanente almacenaje. No busca solo almacenar gas bajo la tierra, sino que objetiva que moléculas puedan ligarse de forma duradera a través diversos procesos de reacciones químicas y fijaciones basado a los entornos colocados (Alenza-García, 2011).
- **Bosque nativo o primario:** Definido como bosques oriundos con capacidades autorregenerativas, donde ni actividades humanas ni procesos ecológicos fueron de manera significativa alterados (FAO, 2010).
- **Café:** semilla procedente de un arbusto o árbol de cafeto, perteneciente a la familia Rubiaceae y adecuado a climas cálidos, con cultivos expandibles en tiempos próximos (Echevarri, 2005).
- **Captura de carbono:** proceso donde el C es mantenido en capas de suelos forestales, el cual se originó por fragmentación del material parental (roca madre) y donde es desarrollado organismo vegetales, el cual va depositando materiales los cuales son conocidos como capas. En estas capas se va acumulado cierta cantidad de C la cual seguirá incrementándose si el proceso de formación de suelo lo hace (Benjamín & Masera, 2011)

- **Dióxido de carbono (CO₂):** gas poco reactivo, denso e incoloro. Es un compuesto presente en la atmosfera (específicamente en la troposfera), con una cantidad de 350 partes por millón (ppm). Su ciclo está relacionado al oxígeno naturalmente (Raynaud et al. 1993).
- **Efecto invernadero:** fenómeno de beneficio y natural para la humanidad. Donde ciertos gases tienen la capacidad de retener la radiación solar, la cual es emitida a la superficie terrestre, lo que ayuda a mantener la T de la tierra a un cierto grado para que se desarrolle la vida (Concienciaeco, 2012).
- **Gases de efecto invernadero:** Entre los principales gases de efecto invernadero (GEI) podemos citar: vapor de agua (H₂O), el ozono (O₃), el óxido nitroso (N₂O), dióxido de carbono (CO₂), y el metano (CH₄) (Benavides, 2007).
- **Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos:** son incentivos, herramientas, instrumentos, y esquemas que permiten invertir y transferir recursos económicos, así como, los no financieros e financieros, para establecer relaciones entre retribuyentes y contribuyentes del servicio ecosistémico, buscando la sostenibilidad, conservación y recuperación de estos servicios (Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos, y Ley N° 30215,).
- **Servicios ecosistémicos:** son conocidos como aquellos que generan beneficios sociales, económicos, y ambientales, así como, indirectos y directos, que las personas consiguen por intermedio de los ecosistemas correctamente. Entre estos podemos citar a: regulación hídrica de las cuencas, conservación de la biodiversidad, atrape de C, conformación de suelos, recursos genéticos proporcionados, y belleza paisajística (Ley

n.º 30215, Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos).

- **Sistemas agroforestales:** sistemas mixtos con diversos usos de la tierra llevado a la práctica, donde los árboles conviven temporalmente y/o espacialmente con cultivos agrícolas y/o animales (Ortiz & Riascos, 2006).
- **Sistema agroforestal de café.** Manejos y prácticas de cultivo, donde hay una mezcla o asociación de café con especies arbóreas, buscando un buen manejo, conservación de ambos, agua y suelo. Por otro lado, un mantenimiento e incremento en las producciones agrícolas garantizando así el desarrollo económico, social y la sostenibilidad de las poblaciones cafeteras (Cenicafé, 2012).
- **Valor económico:** concepto utilitario u antropocéntrico o utilitario (relacionado a la utilidad, bien o servicio que le genera a las personas). Bienestar producido por la interacción en el contexto realizado entre un objeto (servicio o bien) y un individuo (sociedad o individuo) (MINAM, 2015).
- **Valoración económica:** herramienta empleada para determinar, en valores monetarios, cual es el valor de un servicio o bien ecosistémico, independiente de que cualquiera de estos posee o no un precio establecido en el mercado (MINAM, 2013).

2.4. Formulación de hipótesis.

2.4.1. Hipótesis general

La capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo es mayor en el bosque nativo que en los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.)

del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.

2.4.2. Hipótesis específicos

- La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pacay (*Inga adenophylla* P.) es menor comparado con el bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.
- La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) – pino (*Pinus tecunumanii* F.) es menor comparado con el bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.
- La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el bosque nativo es superior a los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.
- El valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono es mayor en el bosque nativo que en los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.

2.5. Identificación de variables.

2.5.1. Variable dependiente

Valoración Económica del carbono del suelo en el bosque nativo y sistemas agroforestales de café (*C. arabica* L.) - pacay (*I. adenophylla* P.) y café (*C. arabica* L.) - pino (*P. tecunumanii* F.)

2.5.2. Variable Interviniente

Selección de muestra.

2.5.3. Variable independiente

Almacenamiento de COS.

2.6. Operacionalización de variables.

Variable	Sub-dimensiones	Indicador
Almacenamiento de COS	Concentración de COS	t C/ha de suelo
	Densidad Aparente	g de suelo cm ³
	Profundidad	cm
Valoración Económica de Carbono del suelo en el bosque nativo y de los sistemas agroforestales de café (<i>C. arabica</i> L.) - pacay (<i>I. adenophylla</i> P.) café (<i>C. arabica</i> L.) - pino (<i>P. tecunumanii</i> F.)	Estimación del servicio ambiental	CO ₂ e
	Valor económico	VE (Precio de mercado)

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Por el tipo de la investigación, el presente estudio reúne las siguientes condiciones:

- Según su finalidad es aplicada, ya que la presente investigación permitió determinar el valor económico del almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el bosque nativo y los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) - pacay (*Inga adenophylla* P.) y de café (*C. arabica* L.) - pino (*P. tecunumanii* F.).
- Según su alcance temporal es sincrónica, ya que la evaluación se hará solo en el año 2020.
- Según su profundidad es explicativa porque la investigación no solamente pretenderá medir las variables, sino estudiar sus relaciones entre ellas.

- Según su fuente es primaria, debido a que la investigación utilizará datos de primera mano, recogidos directamente de la presente investigación.
- Según su carácter es cuantitativo debido al estudio de cuantificación del almacenamiento de carbono y valor económico del mismo.
- Según su naturaleza es experimental, pues se apoya en la observación y medición del almacenamiento de carbono.
- Según el marco en que tendrá lugar será de laboratorio, ya que las observaciones se realizarán en un ambiente artificial.

3.2. Método de investigación.

La actual investigación se desarrolló de acuerdo a la metodología desarrollada por ICRAF (World Agroforestry Center) “Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales” (2009) y modificado para los objetivos de la presente investigación. Se utilizó tal metodología por las razones a seguir: (a) aplicar esta metodología no incurre en usar instrumentos ni costosos ni sofisticados de medición y (b) diseñar y tomar las muestras son relativamente fáciles.

La metodología constó de cinco (05) etapas. En la etapa N° 01 se realizó la planificación en gabinete y determinación del área en campo tomando en cuenta la metodología del ICRAF para la determinación de la cobertura del proyecto tanto para el fundo con los SAF como para el bosque nativo. La etapa N° 02 comprendió la implementación de las parcelas de muestreo en campo; es decir, la determinación del tamaño de parcelas, número de parcelas y profundidad de muestreos. En la etapa N° 03 se estimaron los stocks de carbono por cada SAF y bosque nativo, según procedimientos y cálculos señalados por el ICRAF. En la etapa N° 04 se realizó la estimación del servicio ambiental. Finalmente, en la etapa N° 05 se valoró

económicamente la capacidad de almacenamiento de carbono para cada SAF y bosque nativo y se elaboraron los resultados y conclusiones.

3.2.1. Etapa N° 01: Planificación en gabinete y determinación del área en campo.

Esta etapa incluyó la búsqueda y recopilación de datos e información virtual y física. Específicamente, consistió en lo siguiente:

- i) Determinación del área de cobertura del proyecto.** De acuerdo a las posibilidades en cuanto al área de cobertura mencionados por el ICRAF, el área de los SAF (café – pacay y café – pino) que se utilizó están contenidos dentro del Fundo “La Florida” y el estudio abarca el área total de la propiedad, lo mismo se determinó para el área de cobertura del bosque nativo.
- ii) Estratificación del área de investigación.** El fundo cuenta con dos sistemas agroforestales: café – pacay y café – pino, el SAF café -pino presenta mínima vegetación primaria a comparación del SAF Café-Pacay, fisiografía accidentada por laderas moderadamente empinadas, fertilización tipo orgánico, en su conjunto abarcan un área aproximado de 4.5 hectáreas; en el caso del bosque primario es un área con abundante vegetación primaria, de relieve accidentado y pequeña extensión (2 ha). Cabe mencionar que ambos se encuentran dentro de la zona de vida Bosque muy húmedo – Montano Bajo Tropical.
- iii) Determinación de los depósitos de carbono a medir.** Tomando como base la “Guía de las buenas prácticas del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y bosques”. Se seleccionó el tipo de proyecto “Plantaciones agroforestales” (Tabla N° 3), dentro del cual se seleccionó el siguiente depósito: “R” o “Recomendado” (Suelo).

Dicho depósito fue seleccionado bajo criterios de costo, logística y tiempo.

Tabla 3. Tipos de depósitos de carbono de acuerdo a la GBP UTCUTS. 2014.

Tipo de proyecto	Tipos de depósitos de carbono						Objetivo
	Biomasa viva			Biomasa muerta		Suelo	
	Árboles	Vegetación no arbórea	Raíces	Madera Muerta	Hojarasca		
Conservación del bosque	S	T	R	T	S	R	Reducción de emisión de CO ₂
Manejo forestal sostenible	S	T	R	T	S	T	
Restaurar vegetación nativa	S	T	R	S	S	T	Reforestación (captura de CO ₂)
Plantaciones forestales	S	N	R	T	T	R	
Plantaciones agroforestales	S	S	T	S	S	R	

S: Necesario; R: Recomendado; N: No recomendado; T: Quizá, dependiendo de las exigencias del mercado.

Fuente: World Agroforestry Centre (ICRAF) 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades Rurales.

3.2.2. Etapa N° 02: Implementación de parcelas de muestreo.

Esta etapa comprendió lo siguiente:

- i) **Tamaño de las parcelas.** El tamaño de las parcelas se determinó de acuerdo al tipo de depósito de carbono a medir, siendo esta la medida del depósito de suelo: 1 m x 1 m (1m²).
- ii) **Número de parcelas.** El número de parcelas fue de tres unidades por cada SAF (café – pacay, café – pino) y bosque nativo.
- iii) **Profundidad de muestreos.** Tomando en cuenta las recomendaciones de profundidad por Rüginitz, M. (2009), en cada parcela se consideró realizar 3 muestreos de suelo a diferentes profundidades (0 – 10 cm, 10 – 20 cm y 20 – 30 cm) para determinar el carbono orgánico y 3 muestreos de suelo con las mismas profundidades para determinar la densidad aparente.

3.2.3. Etapa N° 03: Estimación de la biomasa del suelo.

La estimación de biomasa del suelo (stock de COS) para los dos SAF y bosque nativo se realizó de acuerdo a los procedimientos y cálculos detallados en el ítem 3.5.1. (muestreo en campo) y 3.5.2 (análisis en laboratorio y gabinete).

3.2.4. Etapa N° 04: Estimación del servicio ambiental.

Una vez que se calculó el stock de carbono orgánico del suelo se multiplicó por un valor numérico correspondiente a 3.67 como se señala en el ítem 3.5.3(a) para saber la cantidad de CO₂e almacenado (servicio ambiental).

3.2.5. Etapa N° 05: Valoración económica.

Finalmente, esta etapa comprendió la estimación económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono a través de la multiplicación del valor dado para la estimación ambiental y el valor monetario sugerido para la emisión de dióxido de carbono equivalente por cada tonelada, como se señala en el ítem 3.5.3(b).

3.3. Diseño de investigación.

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con un nivel de confianza del 95%, cuya estructura corresponde a tres sistemas de tratamiento (SAF café – pino, SAF café – pacay y bosque nativo) y tres repeticiones.

Tabla 4. Codificación del diseño experimental.

Sistemas de tratamiento		Repeticiones
SAF café – pacay	A	A1
		A2
		A3
SAF café – pino	B	B1
		B2
		B3
Bosque nativo	C	C1
		C2
		C3

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Población y muestra.

3.4.1. Población

La población estuvo constituida por el bosque nativo, sistema agroforestal de café (*C. arabica* L.) - pacay (*I. adenophylla* P.) y sistema agroforestal de café (*C. arabica* L.) - pino (*P. tecunumanii* F.) en la CC.NN. Tsachopen del distrito de Chontabamba.

3.4.2. Muestra

La muestra es un porcentaje de suelo que corresponde al bosque nativo, al sistema agroforestal de café (*C. arabica* L.) - pacay (*I. adenophylla* P.) y al sistema agroforestal de café (*C. arabica* L.) - pino (*P. tecunumanii* F.). Las muestras fueron colectadas de acuerdo a la metodología desarrollada por el ICRAF, constituyendo tres (3) muestras de suelo para medición de carbono orgánico y tres (3) muestras de suelo para medición de densidad aparente.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.5.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos para muestreo de suelo en campo

La obtención de muestras de suelo para el cálculo de carbono y densidad aparente se realizó de acuerdo a la metodología desarrollada por Rüginitz (2009) y modificada de acuerdo a las condiciones del lugar.

En cada unidad experimental se ubicaron al azar tres parcelas con dimensiones de un metro de largo por un metro de ancho, en cada una de ellos se colectaron tres muestras de suelo para el cálculo de carbono orgánico y tres muestras de suelo para el cálculo de la densidad aparente, según la profundidad de muestreo (0-10, 10-20, 20-30 cm); la extracción de las muestras de suelo se hizo mediante el uso de un cilindro de metal de volumen conocido.

Las muestras extraídas para el cálculo del carbono orgánico fueron separadas del cilindro de metal y mezcladas (homogenizadas) en un mismo recipiente de acuerdo a su profundidad, luego se retiró una muestra compuesta de 200 gr de cada profundidad, para luego ser llevadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, previa identificación de acuerdo a cada tratamiento y profundidad de muestreo; en el caso de las muestras extraídas para el cálculo de la densidad aparente las muestras también fueron separadas y transportadas al laboratorio antes mencionado, con su respectiva identificación.

Tabla 5. Instrumentos de campo.

Materiales y equipos de campo	
– Sable	– Bolsas de papel
– Pala	– Cámara digital
– Martillo	Samsung Galaxy
– Cinta métrica 50 m	A30S
– Estacas	– Plumón indeleble
– Rafia	– Cinta masking
– Cilindros de metal	– Cuaderno de campo
– GPS	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos para análisis de las muestras de suelo en laboratorio y gabinete.

a) Determinación de materia orgánica (método de calcinación)

El método de calcinación para la determinación de la materia orgánica implica la destrucción de toda la materia orgánica del suelo a altas temperaturas seguido de la recogida y medición de CO₂ desprendido.

Con este método, el procedimiento que se realizó es el siguiente: Se pesaron aproximadamente 5g de muestra en crisoles de porcelana, posteriormente fueron colocados en estufa por 24 horas a 105°C. Las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas. Luego las muestras se colocaron en una mufla durante 3 horas a 400 °C, posteriormente se transfirieron a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente (Davies (1974) y Schulte & Hopkins (1996)).

El contenido de materia orgánica se calculó por diferencia de peso en las distintas temperaturas, según:

$$\%MO = \frac{P S_{inicial} - P S_{final}}{P S_{inicial}} \times 100$$

Donde:

%MO : Materia orgánica

PS_{inicial} : Peso seco inicial (g)

PS_{final} : Peso seco final (g)

Para la realización de dicho procedimiento se utilizaron los siguientes instrumentos de laboratorio:

Tabla 6. Instrumentos de laboratorio.

Materiales y equipos de laboratorio
– Balanza analítica
– Tamizador
– Mufla
– Secadora
– Crisoles de porcelana
– Estufa
– Pinzas

Fuente: Elaboración propia.

b) Cálculo del porcentaje de carbono orgánico en el suelo por horizonte de muestreo.

La fórmula estuvo representada por:

$$\%CO = \frac{\%MO}{1.724}$$

Donde:

%CO : Porcentaje de carbono.

%MO : Porcentaje de materia orgánica.

1.724 : Factor de Van Vammelen.

c) Cálculo del almacenamiento del carbono orgánico del suelo (COS) por horizonte de muestreo

La fórmula utilizada estuvo representada por:

$$COS = CO\% * da * Ps$$

Donde:

COS : Carbono orgánico de suelos (tC/ha).

CO% : Porcentaje de carbono en el suelo.

da : Densidad aparente (g/cm³).

Ps : Profundidad de muestreo (cm).

d) Determinación de la densidad aparente (da).

Las muestras que se obtuvieron en campo fueron secadas en una estufa a una temperatura de 105°C hasta peso constante. La fórmula empleada para la densidad aparente del suelo es el siguiente:

$$DA = \frac{PNS}{VCH}$$

Donde:

DA : Densidad aparente, en g/cm³.

PSN : Peso seco del suelo dentro del cilindro (g).

VCH : Volumen del cilindro (cm³).

Los materiales y equipos utilizados para el cálculo en gabinete son los mencionados a continuación:

Tabla 7. Materiales y equipos de gabinete.

Materiales de gabinete	
- Laptop Core 7	- Cuaderno de apuntes
- Mouse	- Regla
- Impresora	- Lápiz
- USB 16 GB	- Borrador
- Lapicero	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Técnica para la determinación de la Valoración Económica (VE)

a) Estimación del Servicio Ambiental

De acuerdo a Forest Trends (2010), sobre la base de los pesos moleculares (44/12), una tonelada de carbono equivale a 3.67 toneladas de CO₂e. De esta forma, para saber la cantidad de CO₂e capturado (servicio ambiental), se multiplicará la cantidad del *stock* de carbono por el valor numérico 3.67. A continuación, se muestra la fórmula que se utilizó:

$$CO_{2e} = \Delta C_{TOTAL} (t C/sistema de producción) \times 3.67$$

Donde:

CO₂e: Dióxido de carbono equivalente.

ΔC TOTAL: Cantidad de carbono total

3.67: Factor de conversión.

b) Valoración Económica (VE)

Esta última etapa comprendió la estimación económica del servicio ambiental de captura de carbono en los sistemas de producción a través de la multiplicación del valor dado para la estimación ambiental y el valor monetario sugerido para la emisión de dióxido de carbono equivalente por cada tonelada. Este cálculo se observa a través de la siguiente fórmula:

$$VE = t CO_2 \times P$$

Donde:

t CO₂: Toneladas fijadas en el fundo

P: Precio utilizado para cada tonelada de CO₂; en este caso, el indicado por Sohngen y Beach, USD 27.25 del año 2013.

Con respecto al valor del precio utilizado para cada tonelada de CO₂, este se basó sobre la información presentada por los investigadores del clima Brent Sohngen y Robert H. Beach, quienes indican que USD 27.25 es un precio justo para valorar económicamente un servicio ecosistémico a nivel mundial ya que favorecería el secuestro de 76 billones de toneladas de carbono y 422 millones de hectáreas de bosques adicionales (Nature Conservancy, 2013).

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Para la organización de los datos recolectados de campo y laboratorio se hizo uso de matrices de tabulación estructurada y para el análisis de las variables se aplicó la técnica de análisis de varianza ANOVA y prueba de Tukey. Los datos fueron procesados en el programa MS Excel y RStudio.

3.7. Tratamiento estadístico de datos

Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico RStudio.

3.8. Selección, Validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.

La selección de las muestras se basó de acuerdo a la “Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales”, metodología desarrollada por el ICRAF. Los datos obtenidos fueron analizados por la prueba Tukey que permite observar si existe diferencias estadísticas entre los tratamientos y las variables evaluadas. Se comparó las diferencias de medias con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Asimismo, se llevó a cabo un análisis de correlación y regresión para encontrar relaciones matemáticas

entre porcentaje de carbono orgánico - carbono orgánico del suelo y densidad aparente - carbono orgánico del suelo.

3.9. Orientación ética.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se ha respetado citas y autoría de aquellos que hayan abordado en la temática de medidas de adaptación y mitigación frente a los efectos del cambio climático, asimismo se atinó a plasmar la bibliografía correspondiente a fin de cumplir los requisitos mínimos exigidos para la investigación y que cumpla con los estándares establecidos por la normativa y exigibilidad de la universidad.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo y laboratorio.

4.1.1. Procedimiento del trabajo en campo.

Una vez determinado la cobertura del área de investigación de los SAF del cultivo de café y bosque nativo se delimitaron 3 parcelas, con previa remoción de la hojarasca que se encontraba sobre el suelo. Las parcelas fueron de 1 x 1 m, distribuidas al azar en la parte alta, media y baja del terreno como se muestra en la figura 1.

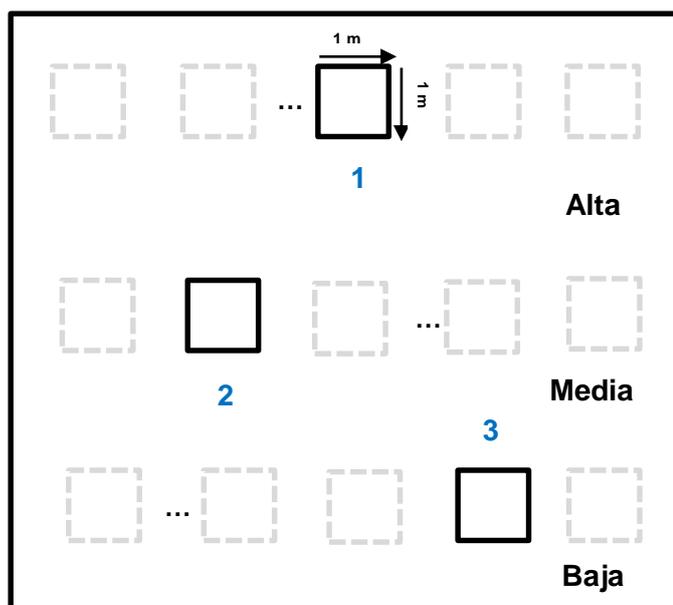


Figura 1. Distribución de parcelas por sistemas de tratamiento.

Para el muestreo de suelo se establecieron 4 puntos dentro de cada parcela. En estos puntos se colectaron muestras de suelo a 3 profundidades (0-10 cm, 10 - 20 cm, 20 – 30 cm) como se muestra en la Figura 2.

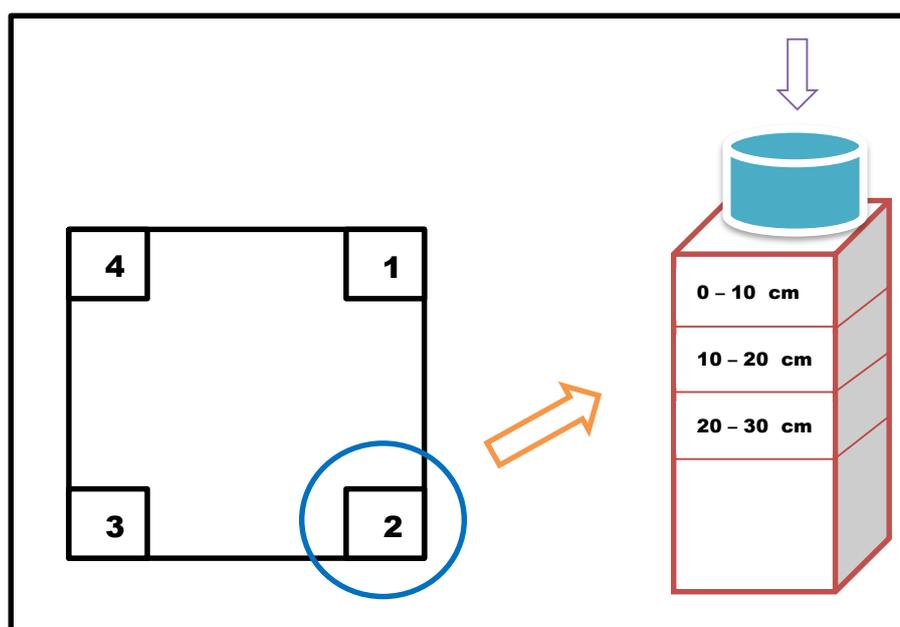


Figura 2. Puntos de muestreo a 3 profundidades.

En el punto 1, 2 y 3 se extrajeron muestras simples por profundidad. Luego estas se mezclaron y se obtuvieron una muestra compuesta por cada profundidad, las cuales fueron guardadas en bolsas de papel con su respectiva etiqueta para la determinación de materia orgánica en el laboratorio.

En la obtención de muestras para determinar la densidad aparente del suelo, solo se colectó del punto 4, a tres profundidades. Se introdujo el cilindro de metal con ayuda de un martillo, luego se extrajo el suelo asegurándose que ocupe todo el cilindro. Con ayuda de un sable se cortó al ras de la muestra en la parte superior e inferior del cilindro. El contenido se depositó en una bolsa de papel con su respectiva etiqueta.

4.1.2. Procedimiento del trabajo en laboratorio.

Las muestras colectadas en campo se llevaron al Laboratorio de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión sección Oxapampa para ser analizadas.

El método utilizado para determinar %MO fue el de Calcinación, cuyo procedimiento fue el siguiente:

Las muestras de suelo fueron colocadas en la estufa a 105°C durante 24 horas.

- Se pesaron aproximadamente 5 g de muestra en crisoles de porcelana.
- Seguidamente fueron colocados en la estufa por 24 horas a 105°C.
- Pasado ese tiempo las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas.

- Luego las muestras se colocaron en una mufla durante 3 horas a 400 °C.
- Posteriormente se transfirieron a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente.

Por otro lado, el método utilizado para determinar densidad aparente fue del cilindro de volumen conocido, cuyo procedimiento fue el siguiente:

- Las muestras de suelo contenidas en bolsas de papel fueron colocadas en la estufa a 105°C durante 24 horas.
- Al concluir ese tiempo las muestras se sacaron de la estufa y se pesaron en la balanza analítica.
- Por último, se registraron los datos de peso seco del suelo.

Los datos obtenidos en el laboratorio fueron ordenados en una hoja de cálculo de Excel 2013 aplicando fórmulas establecidas para el cálculo de COS y luego procesados en RStudio utilizando el Análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe significación estadística, seguidamente se aplicó la prueba de Tukey a una tasa de error de 0.05 (equivalente a un nivel de confianza simultáneo de 95%) de probabilidad para determinar el mejor sistema de tratamiento con respecto al contenido de carbono en el suelo.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Determinación de porcentaje de materia orgánica en el suelo.

Para la determinación del porcentaje de materia orgánica se reemplazaron los datos de laboratorio que se observan en el Anexo 2(2.1) en la siguiente fórmula:

$$\%MO = \frac{P S_{inicial} - P S_{final}}{P S_{inicial}} \times 100$$

Los resultados del %MO de cada sistema de tratamiento se puede observar en la Tabla 8. El bosque nativo (C) presentó mayor contenido de materia orgánica (%) con 10.5 a comparación del sistema agroforestal café – pacay (A) y sistema agroforestal café – pino (B) con 4.5 y 2.5, respectivamente. Asimismo, se observó que, en todos los sistemas de tratamiento, a 10 cm de profundidad la cantidad de materia orgánica es relativamente mayor y disminuye a medida que aumenta la profundidad.

Tabla 8. Porcentaje de materia orgánica en cada sistema de tratamiento.

Sistemas de tratamiento	Parcela	Profundidad	%MO		
A	A1	0 - 10	4.779	4.293	
		10 - 20	4.575		
		20 - 30	3.525		
	A2	0 - 10	4.747	4.515	4.478
		10 - 20	4.839		
		20 - 30	3.960		
	A3	0 - 10	5.050	4.626	
		10 - 20	5.005		
		20 - 30	3.822		
C	C1	0 - 10	11.723	10.608	
		10 - 20	10.525		
		20 - 30	9.575		
	C2	0 - 10	11.574	10.456	10.548
		10 - 20	10.371		
		20 - 30	9.423		
	C3	0 - 10	11.662	10.580	
		10 - 20	10.450		
		20 - 30	9.628		
B	B1	0 - 10	3.291	2.576	2.480
		10 - 20	2.736		

	20 - 30	1.703	
B2	0 - 10	3.103	2.286
	10 - 20	2.264	
	20 - 30	1.492	
B3	0 - 10	3.330	2.576
	10 - 20	2.595	
	20 - 30	1.803	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Determinación de porcentaje de carbono orgánico en el suelo.

La determinación del porcentaje de carbono implicó la división entre el %MO y el factor Vam Vammelen (1.724) como se muestra en el Anexo 2 (2.2). Para dicho cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%CO = \frac{\%MO}{1.724}$$

En la tabla 9 se muestra los resultados de %CO de cada sistema de tratamiento: SAF Café-Pacay (A), SAF Café-Pino (B) y Bosque nativo (C), a diferentes profundidades. El sistema de tratamiento C presenta mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo con 6.1% a comparación de los sistemas de tratamiento A y B con 2.6% y 1.4%, respectivamente. Asimismo, se observa que de 0 - 10 cm de profundidad hay mayor presencia de carbono orgánico, esto debido a que existe mayor actividad microbiana (procesos biogeoquímicos) en la superficie del suelo producto de la interacción directa con las variables meteorológicas del clima.

Núñez (2000) considera valores altos de porcentajes de carbono orgánico del suelo a valores mayores a 2.5%, medios si se encuentran entre 1 a 2.5% y bajos si son menores a 1%. Teniendo en cuenta dicho rango podemos decir que C (Bosque nativo) presenta alto porcentaje de carbono orgánico, mientras que A (sistema agroforestal de café –

pacay) y B (sistema agroforestal de café – pino) presentan valores medios, a 30 cm de profundidad.

Tabla 9. Resultados de porcentaje de carbono orgánico.

Sistemas de tratamiento	Parcela	Profundidad (cm)	%CO		
A	A1	0 - 10	2.772	2.490	2.597
		10 - 20	2.654		
		20 - 30	2.045		
	A2	0 - 10	2.753	2.619	
		10 - 20	2.807		
		20 - 30	2.297		
	A3	0 - 10	2.929	2.683	
		10 - 20	2.903		
		20 - 30	2.217		
C	C1	0 - 10	6.800	6.153	6.118
		10 - 20	6.105		
		20 - 30	5.554		
	C2	0 - 10	6.714	6.065	
		10 - 20	6.015		
		20 - 30	5.466		
	C3	0 - 10	6.765	6.137	
		10 - 20	6.062		
		20 - 30	5.585		
B	B1	0 - 10	1.909	1.494	1.438
		10 - 20	1.587		
		20 - 30	0.988		
	B2	0 - 10	1.800	1.326	
		10 - 20	1.313		
		20 - 30	0.865		
	B3	0 - 10	1.932	1.494	
		10 - 20	1.505		
		20 - 30	1.046		

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Determinación de la densidad aparente (da).

Para la determinación de la densidad aparente se realizó la multiplicación del peso seco del suelo y el volumen del cilindro como se observa en el Anexo 2(2.3), la fórmula empleada fue el siguiente:

$$DA = \frac{PNS}{VCH}$$

En la tabla 10 se muestra que el sistema de tratamiento C presenta menor densidad aparente (0.6 g/cm^3) lo que indica mayor contenido de materia orgánica y alta porosidad. Por el contrario, el sistema de tratamiento B muestra un suelo muy compacto (1.1 g/cm^3) con indicios de menor cobertura vegetal debido a las labores culturales que se realizan en dicho sistema agroforestal.

Tabla 10. Resultados de densidad aparente.

Sistemas de tratamiento	Profundidad (cm)	Densidad (g/cm^3)		
A	A1	0 - 10	0.843	0.865
		10 - 20	0.869	
		20 - 30	0.885	
	A2	0 - 10	0.826	0.876
		10 - 20	0.896	
		20 - 30	0.907	
	A3	0 - 10	0.807	0.888
		10 - 20	0.922	
		20 - 30	0.933	
C	C1	0 - 10	0.615	0.640
		10 - 20	0.638	
		20 - 30	0.665	
	C2	0 - 10	0.618	0.647
		10 - 20	0.648	
		20 - 30	0.674	
	C3	0 - 10	0.618	0.642
		10 - 20	0.637	
		20 - 30	0.671	
B	B1	0 - 10	0.952	1.173
		10 - 20	1.280	
		20 - 30	1.287	
	B2	0 - 10	1.191	1.274
		10 - 20	1.309	
		20 - 30	1.322	
	B3	0 - 10	1.174	1.227
		10 - 20	1.248	
		20 - 30	1.257	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Determinación del almacenamiento del carbono orgánico del suelo (COS).

Los resultados de COS que se muestran en la tabla 11 fueron calculados con los datos de %CO, DA y a una profundidad de 30 cm, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{COS} = \text{CO}\% * \text{da} * \text{Ps}$$

El sistema de tratamiento C muestra mayor cantidad de carbono orgánico en toneladas por hectárea con 177,657; mientras que, en los SAF, el sistema agroforestal A y B presentaron 68.105 tC/ha y 51,959 tC/ha respectivamente. De estos últimos, el sistema agroforestal A indica una mejor calidad de suelo a comparación del sistema agroforestal B.

Tabla 11. Resultados del almacenamiento del carbono orgánico del suelo.

Sistemas de tratamiento	Profundidad (cm)	COS (tC/ha)	
A	0 - 10	70.061	64.496
		69.171	
		54.257	
	10 - 20	68.210	68.715
		75.444	
		62.491	
20 - 30	70.905	71.104	
	80.337		
	62.069		
C	0 - 10	125.513	117.754
		116.888	
		110.863	
	10 - 20	124.548	117.324
		116.980	
		110.444	
20 - 30	125.327	117.892	
	115.907		
	112.443		

			54.533		
	B1	0 - 10	60.918	51.197	
			38.140		
			64.296		
B	B2	10 - 20	51.581	50.065	51.959
			34.318		
			68.025		
	B3	20 - 30	56.372	54.616	
			39.450		

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Estimación del Servicio Ambiental

La fórmula empleada para determinar el dióxido de carbono equivalente estuvo representada por:

$$\text{CO}_2\text{e} = \Delta\text{C TOTAL (t C/sistema de producción)} \times 3.67$$

En la Tabla 12 se puede observar que el sistema de tratamiento C contiene mayor dióxido de carbono equivalente (431.801 CO₂e) comparado a los dos sistemas agroforestales (A y B). Esta gran capacidad de almacenamiento de carbono del bosque nativo (C) muestra un importante escenario de mitigación del efecto del cambio climático.

Por otro lado, el sistema de tratamiento B muestra menor almacenamiento de carbono en el ecosistema del suelo con 190.690 CO₂e y esto debido al cambio de cobertura del suelo en los horizontes superficiales que involucra labores culturales asociados al cultivo de café.

Tabla 12. Resultados de dióxido de carbono equivalente por sistema de tratamiento.

ST	COS	Factor	CO₂e
A	68.105	3.67	249.945
C	117.657	3.67	431.801
B	51.959	3.67	190.690

Fuente: Elaboración propia.

4.2.6. Valoración Económica (VE)

La fórmula para determinar el VE estuvo representada por:

$$VE = t \text{ CO}_2 \times P$$

En la tabla 13 se observan los valores económicos obtenidos al multiplicar la cantidad de CO₂e almacenado en las parcelas evaluadas por el precio de mercado voluntario (USD 27.25 por tonelada de CO₂ equivalente). Cabe resaltar que el monto resultante de cada sistema de tratamiento está asociado al servicio ambiental de almacenamiento de CO₂ por hectárea.

La mayor cantidad de almacenamiento de carbono presenta el bosque nativo (C) con 431.801 CO₂e, correspondiente a un valor económico de \$ 11,766.57. Este monto supera en 45% y 56% a los sistemas de tratamiento A y B, respectivamente.

Tabla 13. Resultados de la valoración económica de los sistemas de tratamiento.

Sistemas de Tratamiento	CO ₂ e	Precio por Sohngen y Beach.
		\$ 27.25
A	249.945	\$ 6,811.00
B	190.690	\$ 5,196.31
C	431.801	\$ 11,766.57

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7. Regresión y correlación entre el porcentaje de carbono orgánico y carbono orgánico del suelo de los sistemas de tratamiento.

El análisis de regresión y correlación entre el porcentaje de carbono orgánico (CO) y el carbono orgánico del suelo (COS) se llevó a cabo entre sistemas de tratamiento (AC, BC y AB), con tres repeticiones. La base de datos se puede observar en el Anexo 2(2.4).

a) Regresión y correlación %CO - COS entre A y C.

En la Figura 3, se observa el diagrama de dispersión lineal entre el porcentaje de carbono orgánico (%) y el carbono orgánico del suelo (tC/ha) de los sistemas de tratamiento A y C. En la Tabla 14, se observa que ambos sistemas presentan una correlación alta y positiva con un 90.03% en A y en C un 99.48%, lo cual revela la contribución significativa de la materia orgánica (%CO) en el contenido de carbono orgánico (tC/ha). Por esto tanto para el sistema de tratamiento A y C, los contenidos de la materia orgánica del suelo, en %CO, fueron relevantes.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede predecir que, por cada unidad de porcentaje de carbono que incremente

en el suelo A y C, la cantidad de carbono orgánico aumentará en promedio 22.508 y 11.89 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

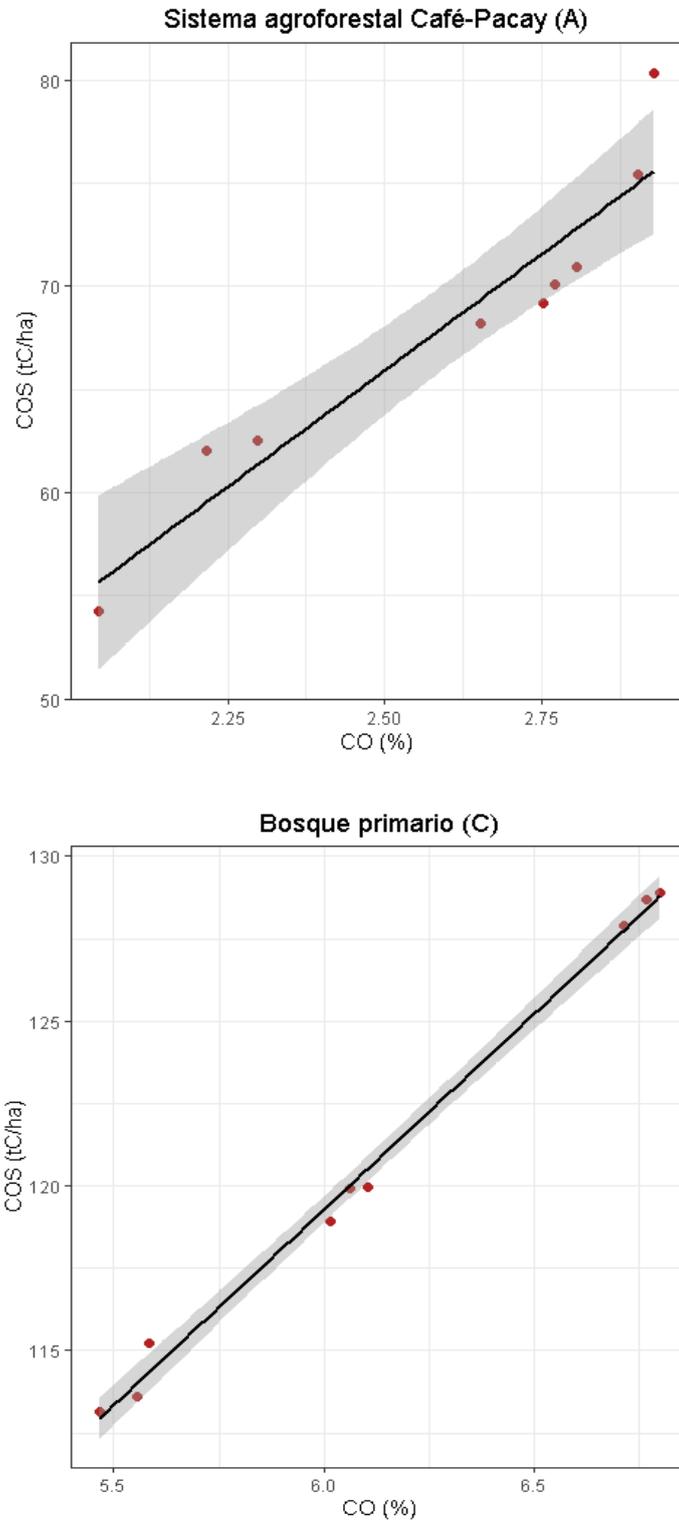


Figura 3. Diagrama de dispersión lineal CO~COS (A y C).

Tabla 14. Regresión y correlación lineal CO-COS (A Y C).

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	A	C
Ecuación lineal	$Y = 9.643 + 22.508X$	$Y = 47.96 + 11.89X$
R ²	0.9003	0.9948
Coefficiente de correlación Pearson	0.9488196	0.9973909
Nivel de Significancia	9.497e-05 (p<0.05)	2.979e-09 (p<0.05)

Fuente: Elaboración propia.

b) Regresión y correlación CO% - COS entre B y C.

En la Figura 4, se observa el diagrama de dispersión lineal entre el porcentaje de carbono orgánico (%) y el carbono orgánico del suelo (tC/ha) de los sistemas de tratamiento B y C. En la Tabla 15, se observa que ambos sistemas presentan una correlación positiva con un 62.04% en B y en C un 99.48%; siendo el sistema de tratamiento C mayor en un 34.44%, en la correlación %CO – COS al sistema de tratamiento B.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede predecir que, por cada unidad de porcentaje de carbono que incremente en el suelo B y C, la cantidad de carbono orgánico aumentará en promedio 23.48 y 11.89 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

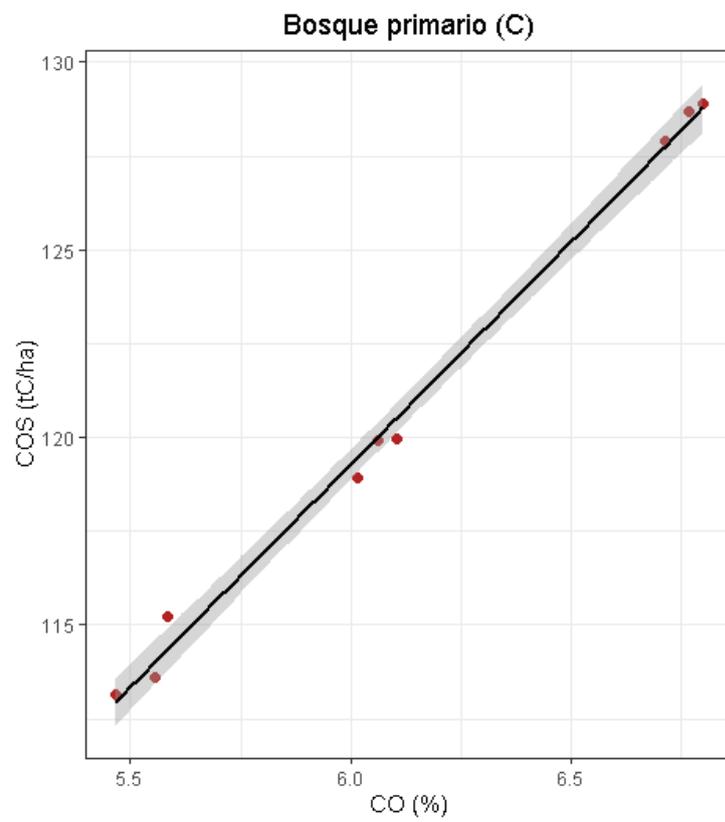
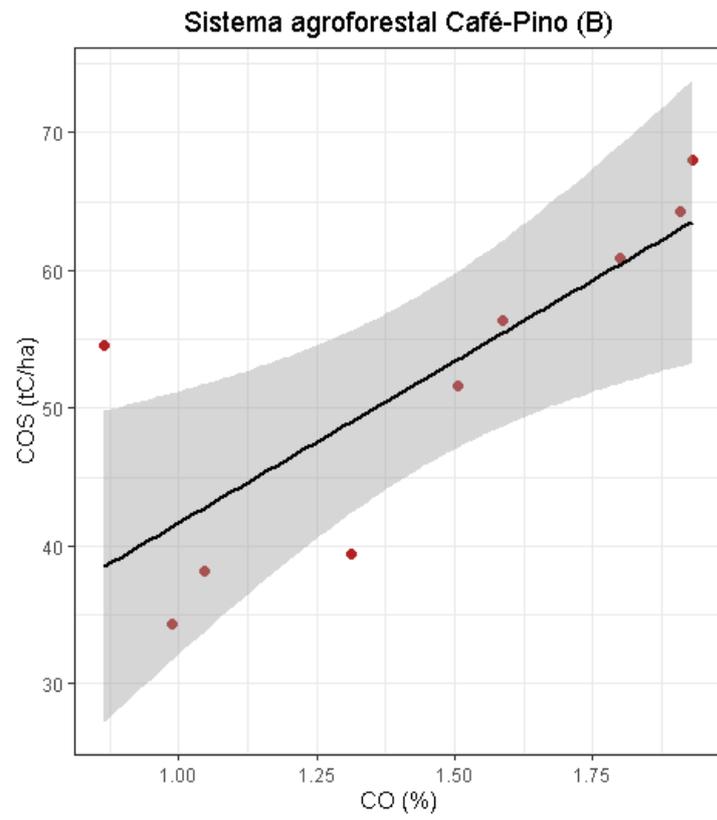


Figura 4. Diagrama de dispersión lineal CO~COS (B y C).

Tabla 15. Regresión y correlación lineal CO~COS (B Y C)

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	B	C
Ecuación lineal	$Y = 18.19 + 23.48X$	$Y = 47.96 + 11.89X$
R^2	0.6204	0.9948
Coefficiente de correlación Pearson	0.7876235	0.9973909
Nivel de Significancia	0.01173 ($p < 0.05$)	2.979e-09 ($p < 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

c) Regresión y correlación CO% - COS entre A y B.

La figura 5, muestra el diagrama de dispersión lineal entre el porcentaje de carbono orgánico (%) y el carbono orgánico del suelo (tC/ha) en el sistema de tratamiento A y B, donde se presenta una correlación positiva en ambos sistemas (Tabla 16) con un 90.03% para A y un 62.04% para B, presentándose una relación significativa entre estas dos variables, por lo que se deduce que el 9.97% en A y el 37.96% en B, están correlacionados a otras variables.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede predecir que, por cada unidad de carbono orgánico (%) que incremente en el suelo A y B, la cantidad de carbono orgánico aumentará en promedio 22.508 y 23.48 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

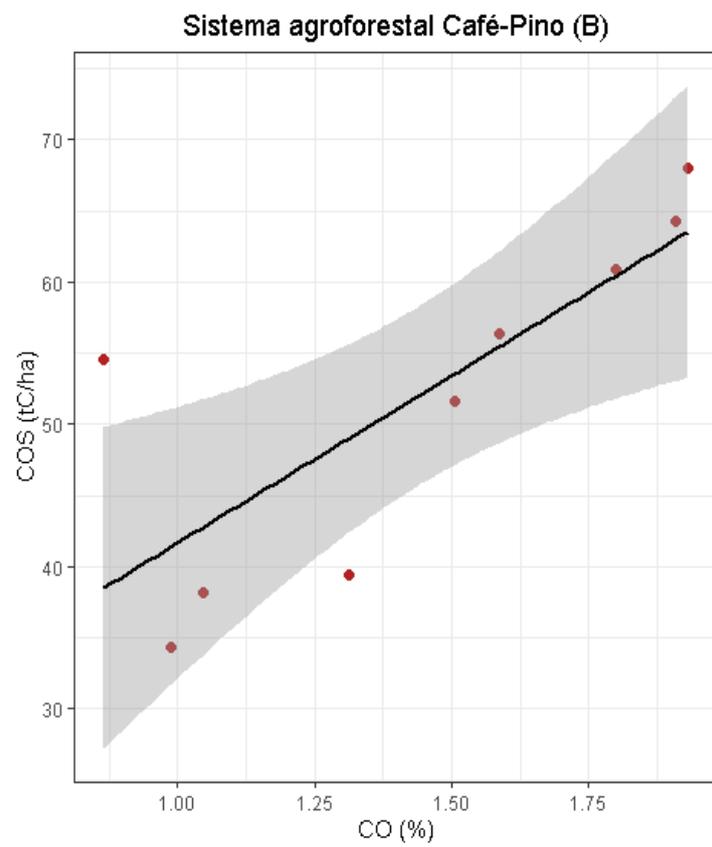
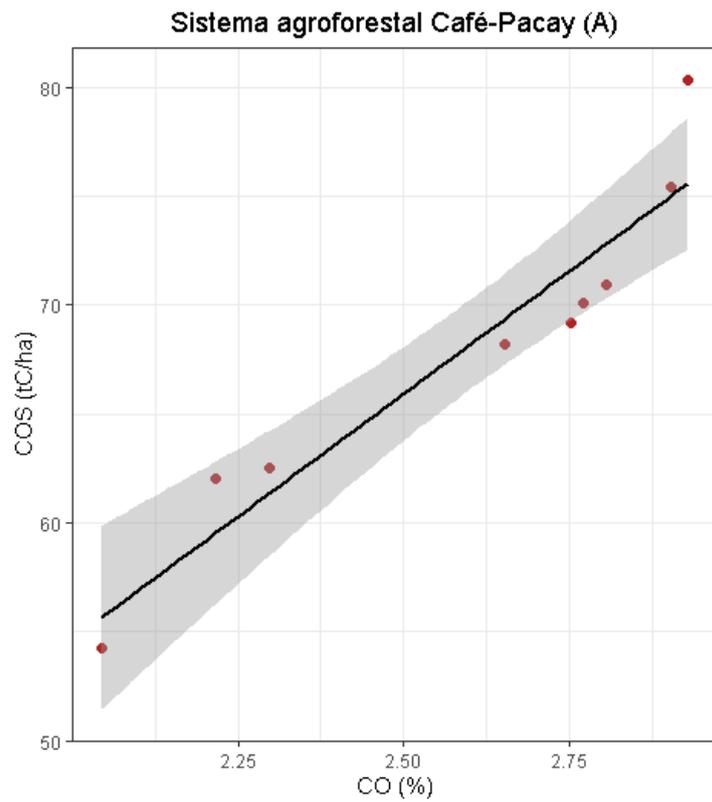


Figura 5. Diagrama de dispersión lineal CO-COS (A y B).

Tabla 16. Regresión y correlación lineal CO-COS (A y C)

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	A	B
Ecuación lineal	$Y = 9.643 + 22.508X$	$Y = 18.19 + 23.48X$
R^2	0.9003	0.6204
Coefficiente de correlación Pearson	0.9488196	0.7876235
Nivel de Significancia	9.497e-05 (p<0.05)	0.01173 (p<0.05)

Fuente: Elaboración propia.

4.2.8. Regresión y correlación entre densidad aparente y carbono orgánico del suelo de los sistemas de tratamiento.

El análisis de regresión y correlación entre la densidad aparente (DA) y el carbono orgánico del suelo (COS) se llevó a cabo entre sistemas de tratamiento (AC, BC y AB), con tres repeticiones. Los datos se pueden observar en el Anexo 2(2.4): Base de datos.

a) Regresión y correlación de DA-COS entre A y C.

La Figura 6, muestra el diagrama de dispersión lineal entre la densidad aparente (g/cm^3) y el carbono orgánico del suelo (tC/ha) en los sistemas de tratamiento A y C. En la Tabla 17, se observa que ambos sistemas presentan una correlación negativa significativa de 89.62% en A y en C un 96.09%, esta relación inversa es probablemente a las prácticas de manejo de suelo relacionado a las labores culturales asociadas al cultivo de café.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede decir que, por cada 1 g/cm^3 de densidad aparente que incremente en el suelo A y C, la cantidad de carbono orgánico del suelo disminuirá en promedio 166.8 y 257 toneladas de carbono por hectárea,

respectivamente. Dicho de otra manera, a mayor compactación del suelo menor será el contenido de carbono orgánico.

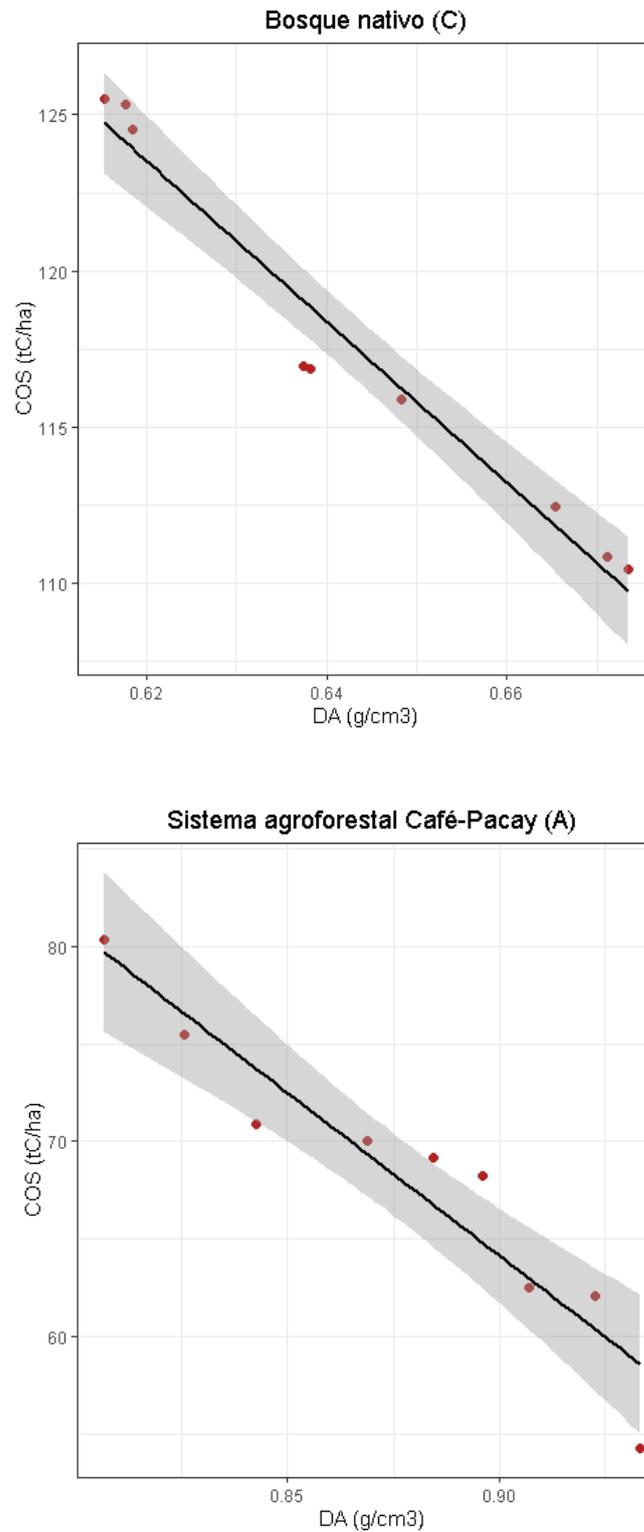


Figura 6. Diagrama de dispersión lineal DA~COS (A y C).

Tabla 17. Regresión y correlación lineal DA~COS (A y C)

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	A	C
Ecuación lineal	$Y = 214.3 - 166.8 X$	$Y = 282.9 - 257X$
R^2	0.8962	0.9609
Coefficiente de correlación de Pearson	-0.9467001	-0.9802563
Nivel de Significancia	0.0001092 ($p < 0.05$)	3.493e-06 ($p < 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

b) Regresión y correlación DA - COS entre B y C.

La Figura 7, muestra el diagrama de dispersión lineal entre la densidad aparente (g/cm^3) y el contenido de carbono orgánico en el suelo (tC/ha) en los sistemas de tratamiento B y C. En la Tabla 18, se observa que ambos sistemas presentan una correlación negativa con un 64% en B y en C un 96.09%, lo cual indica que en los sistemas a medida que aumenta la concentración de carbono orgánico disminuye la densidad aparente.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede decir que, por cada unidad de densidad aparente que incremente en el suelo B y C, la cantidad de carbono orgánico disminuirá en promedio 85.41 y 257 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

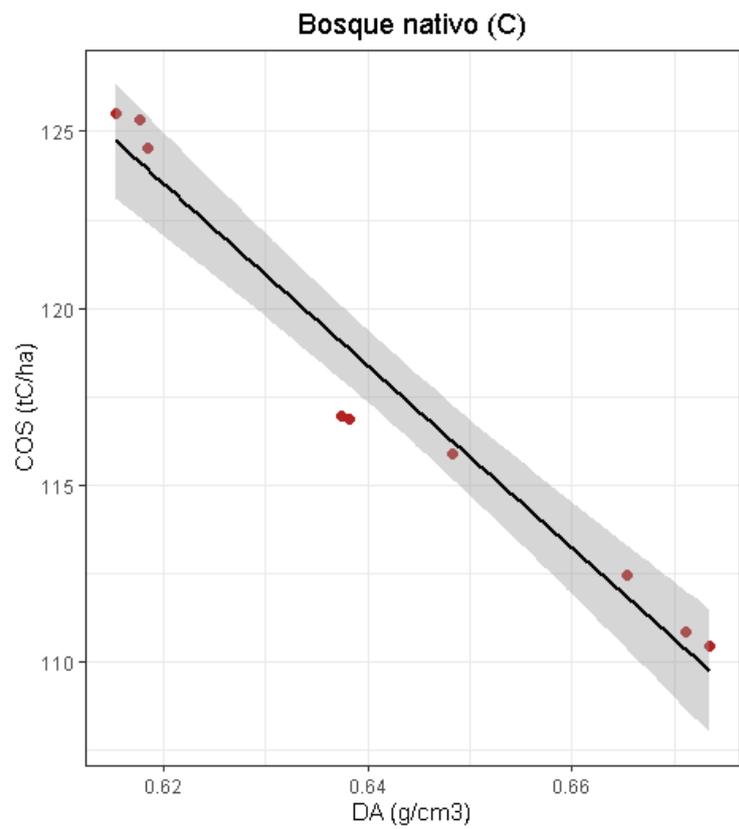
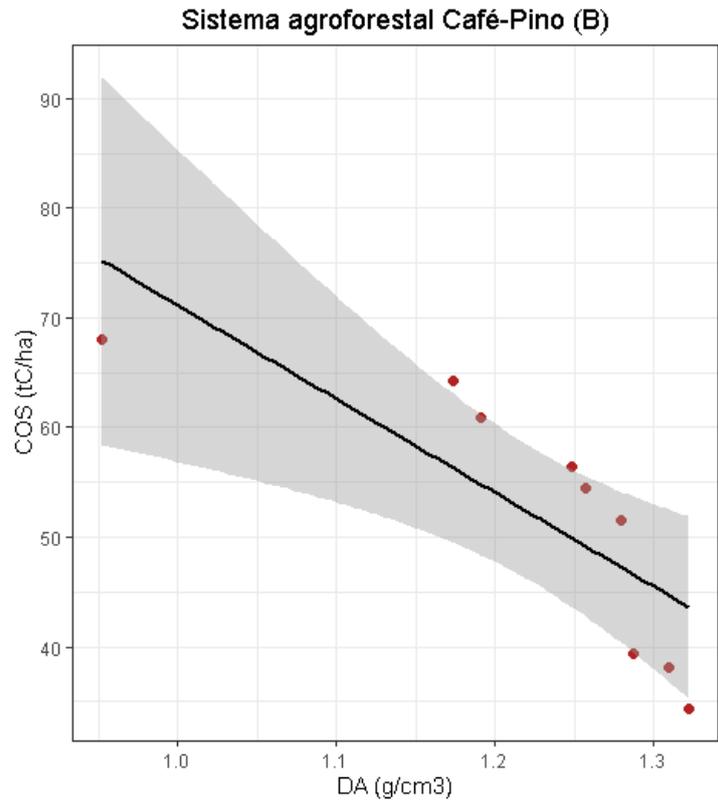


Figura 7. Diagrama de dispersión lineal DA~COS (B y C).

Tabla 18. Regresión y correlación lineal DA~COS (B y C)

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	B	C
Ecuación lineal	$Y = 156.55 - 85.41X$	$Y = 282.9 - 257X$
R^2	0.64	0.9609
Coefficiente de correlación Pearson	-0.7999757	-0.9802563
Nivel de Significancia	0.009632 ($p < 0.05$)	3.493e-06 ($p < 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

c) Regresión y correlación DA - COS entre A y B.

La Figura 8, muestra el diagrama de dispersión lineal entre la densidad aparente (g/cm^3) y el contenido de carbono orgánico del suelo (tC/ha) en el sistema de tratamiento A y B. En la Tabla 19, se observa que ambos sistemas presentan una correlación negativa con un 89.62% en A y en B un 64%, por lo que se deduce que el 10.38% en A y el 36% en B, están correlacionados a otras variables.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación lineal, se puede decir que, por cada unidad de densidad aparente que incremente en el suelo A y B, la cantidad de carbono orgánico disminuirá en promedio 166.8 y 85.41 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

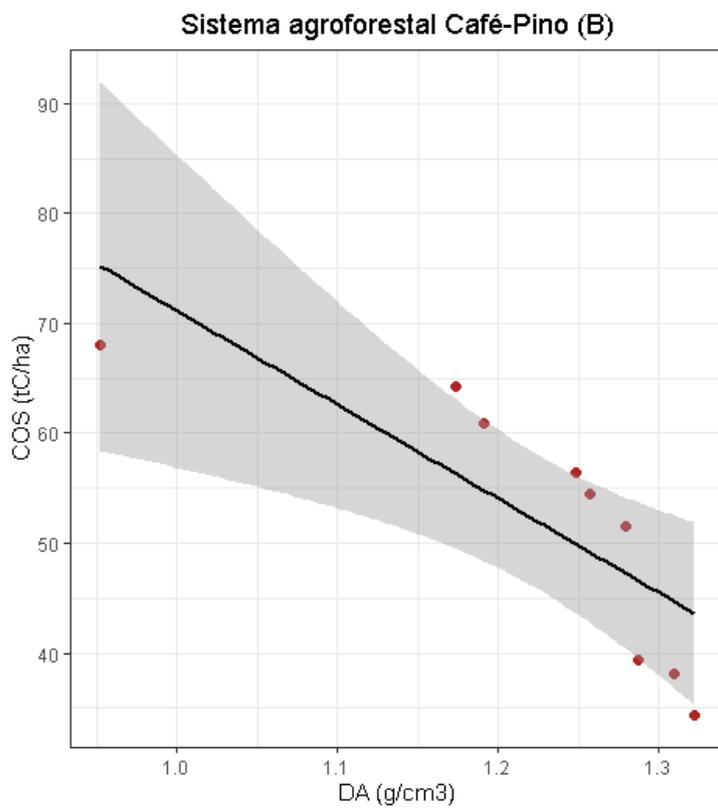
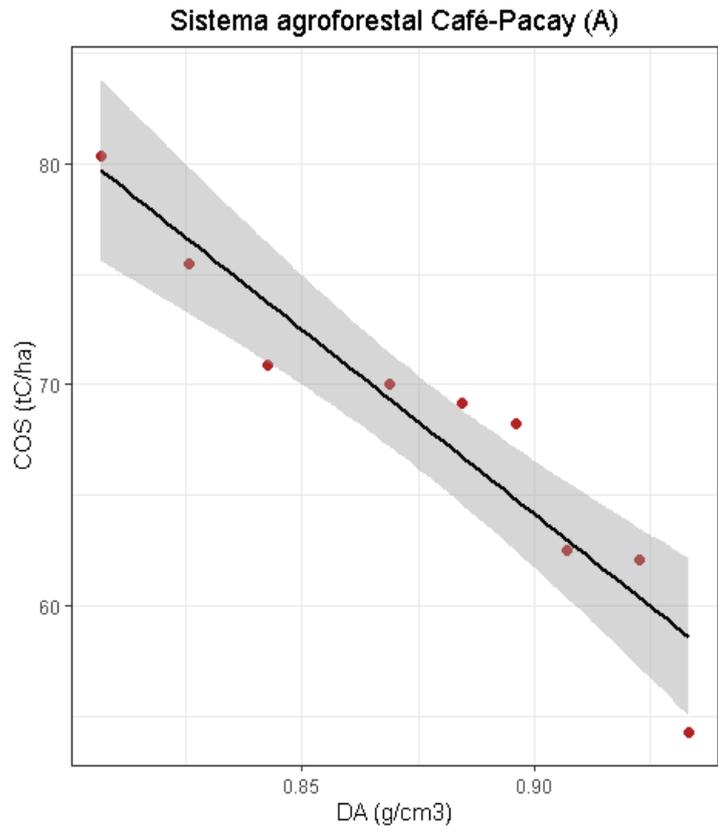


Figura 8. Diagrama de dispersión lineal DA-COS (A y B).

Tabla 19. Regresión y correlación lineal DA~COS (A Y B).

Estadísticos calculados	Sistemas de tratamiento	
	A	B
Ecuación lineal	$Y = 214.3 - 166.8 X$	$Y = 156.55 - 85.41X$
R^2	0.8962	0.64
Coefficiente de correlación de Pearson	-0.9467001	-0.7999757
Nivel de Significancia	0.0001092 ($p < 0.05$)	0.009632 ($p < 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Prueba de hipótesis

Para la prueba de hipótesis y dada la naturaleza de la investigación se hizo uso de la Prueba de ANOVA y Tukey, que permite verificar el nivel de significancia entre sistemas de tratamiento (A, B y C).

4.3.1. Formulación de H_0 y H_1

$H_0: \beta_i = 0$, Hipótesis nula: No hay diferencia significativa entre sistemas de tratamiento.

$H_1: \beta_i \neq 0$, Hipótesis alterna: Existe diferencia significativa entre sistemas de tratamiento.

4.3.2. Nivel de significancia

- Nivel de significancia (α): 0.05 (5%)
- Nivel de confianza (z): $1 - \alpha \rightarrow 1 - 0.05 = 0.95$ (95%)

4.3.3. Criterio

Se rechaza la H_0 si $p < 0.05$ y se acepta H_0 si $p > 0.05$.

4.3.4. Estadístico de Prueba

- ✓ **Análisis de varianza (ANOVA) del CO_2e .**

El análisis de varianza, que se muestra en la Tabla 20, indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al almacenamiento de CO como servicio ambiental entre sistemas de tratamiento; es decir, que el CO₂ capturado (servicio ambiental) está siendo afectado por el tipo de sistema de tratamiento, dando lugar a que este factor influya en los resultados.

De la misma manera, el CV% indica que se encontró diferentes resultados en las repeticiones de cada sistema de tratamiento y al ser un valor bajo, indica que los resultados no están muy dispersos y son homogéneos a la media.

Tabla 20. ANOVA de CO₂e entre sistemas de tratamiento.

Servicio Ambiental (CO ₂ e)						
F. Varianza	gl	S.C.	C. Medio	F	Pr (>F)	Sig.
Sistemas	2	284151	142076	122.564	1.18e-12	*** S
Profundidad	2	749	374	0.323	0.727	NS
Error	22	25502	1159			
CV % 11.7						

Fuente: Elaboración propia.

✓ **Prueba de Tukey del CO₂e.**

La prueba de Tukey (alfa=5%) para los sistemas de tratamiento A, B y C (Tabla 21, Figura 9), muestra que C (Bosque nativo) almacena mayor dióxido de carbono con una media de 431.801, seguido de A (sistema agroforestal de café – pacay) con una media de 249.945 y por último B (sistema agroforestal de café – pino) con

una media de 190.690. Los sistemas de tratamiento son diferentes por superar la diferencia mínima significativa de 40.315.

Tabla 21. Prueba de Tukey del CO₂e al 5% entre sistemas de tratamiento.

Servicio Ambiental (CO₂e)		
Sistemas de tratamiento	Media	Rangos
C	431.801	a
A	249.945	b
B	190.690	c
Dif. Mínima significativa	40.315	

Fuente: Elaboración propia.

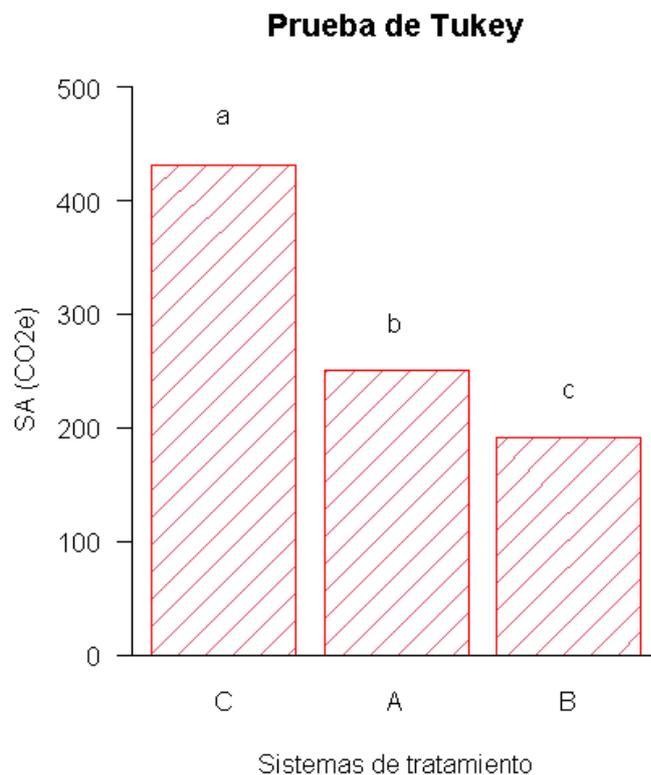


Figura 9. Prueba de Tukey del COS entre A, B y C (alfa=5%).

4.3.5. Decisión

Los resultados reportados en el análisis de variación (ANOVA) y prueba de Tukey del CO₂e (apartado 4.4.1) muestran diferencia significativa (alta variabilidad) entre sistemas de tratamiento con respecto al CO₂ equivalente, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. Asimismo, se muestra que el sistema C (Bosque nativo) almacena mayor cantidad de carbono en el suelo (servicio ambiental) con 431.801 CO₂e comparado con los sistemas agroforestales A y B. Cabe resaltar que estos datos están relacionados directamente con la valoración económica, lo que implica que el bosque nativo también presenta mayor valor económico a comparación de los demás sistemas de tratamiento.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados del análisis de Correlación y regresión entre %CO y COS, reportado en el apartado 4.2.7(a): Correlación y regresión entre el sistema de tratamiento A y C, muestra que el sistema de tratamiento C tiene un 9.45% más de significancia en la correlación %CO - COS en relación al sistema de tratamiento A, esto se debería al tipo de especies de plantas y residuos vegetales sobre la superficie del suelo que aportan una cantidad considerable de materia orgánica, mejorando la disponibilidad de nutrientes, la actividad biológica, la estructura y todas las características que conlleva a la mejora en la calidad del suelo (Céspedes C. & Millas P., 2015).

Asimismo, en el apartado 4.2.7(b): Correlación y regresión de %CO y COS entre el sistema de tratamiento B y C, el sistema de tratamiento C es mayor en un 34.44% al sistema de tratamiento B en la correlación %CO - COS, esto se debería a que un bosque es rico en materia orgánica debido al balance favorable de la relación Precipitación/Evapotranspiración en la zona, lo que

beneficia el desarrollo de una vegetación densa con aportes continuos de biomasa de hojarasca, la cual conforma un colchón sobre la superficie del suelo. Este aporte de biomasa de hojarasca se pierde cuando se produce el cambio de uso de tierra de un bosque a un cultivo (Cabrales et al. 2011).

Con respecto a los resultados del apartado 4.2.7(c): Correlación y regresión de %CO y COS entre el sistema de tratamiento A y B, el sistema agroforestal Café-Pacay (A) tiene un 27.99% más de significancia en la correlación %CO - COS, en relación al sistema agroforestal Café -Pino (B), esta diferencia refleja mejores propiedades físicas del suelo en A y se debería al aporte de hojarasca proveniente del Pacay, pues las distintas especies presentes en un sistema agroforestal originan diferencias en los porcentajes de materia orgánica edáfica (Murray et ál, 2014). La capa de hojarasca en el suelo en sistemas agroforestales cafeteros es fundamental para la reducción de las emisiones de gas carbónico edáfico, debido a que estas regulan la temperatura, la humedad relativa e incorporan paulatinamente materia orgánica al suelo (Sánchez D., 2016).

Por otro lado, se deduce que el 9.97% en A y el 37.96% en B están correlacionados a otras variables como el tipo de manejo agroforestal, la densidad y la distribución de los árboles de sombreado que proporcionan desechos de descomposición diferentes (Schimel, 1994).

Del análisis realizado en el apartado 4.2.8(a): Correlación y regresión de DA y COS entre el sistema de tratamiento A y B, se observa que ambos sistemas presentan una correlación negativa significativa de 89.62% en A y en C un 96.09%, esta relación inversa es probablemente a las prácticas de manejo de suelo relacionado a las labores culturales asociadas al cultivo de café. Por tal motivo, y en concordancia con estudios realizados por Aoki *et al.* (2014) se

puede establecer que la variable DA, muestra sensibilidad ante los cambios de uso de suelo. Del mismo modo podemos decir, que el sistema de tratamiento C tiene un 6.47% más de significancia en la correlación DA-COS en relación al sistema de tratamiento A; esto se debería a la baja densidad y alto contenido de materia orgánica, indicando un suelo poroso, bien aireado, con buen drenaje y buena penetración de raíces (Rubio A.M., 2010).

En el análisis realizado en el apartado 4.2.8(b): Correlación y regresión de DA y COS entre el sistema de tratamiento B y C, se deduce que, el 36% en B y el 3.91% en C, están correlacionados a otras variables como textura, contenido de materia orgánica o tipo de manejo de suelo (Ingaramo et ál. 2007). Por otra parte, el sistema de tratamiento C tiene un 32.09% más de significancia en la correlación DA-COS en relación al sistema de tratamiento B, esto significa que C presenta gran capacidad de almacenar carbono orgánico en el suelo, debido a la baja compactación y estar integrados con mayor número de árboles ya que a menor densidad existe mayor disposición del suelo de incorporar materia orgánica, almacenar carbono, mantener el COS y mejorar la calidad del suelo (Sánchez D., 2016).

Por consiguiente, en el análisis realizado en el apartado 4.2.8(c): Correlación y regresión de DA y COS entre el sistema de tratamiento A y B, se observa que ambos sistemas presentan una correlación negativa con un 89.62% en A y en B un 64%, por lo que se deduce que el 10.38% en A y el 36% en B, están correlacionados a otras variables como la granulometría, estructura y el contenido de materia orgánica (Taboada & Álvarez, 2008).

Del mismo modo, el sistema de tratamiento B tiene un 25.62% menos de significancia en la correlación DA-COS en relación al sistema de tratamiento A, esto se debería a que las plantaciones de pino tienden a presentar suelos

secos y menos orgánicos (Hofstede et ál. 2002), pues algunos estudios revelan la elevada evotranspiración de los forestales de pino reducen la producción de agua en un promedio de 242 mm/año⁻¹ (Buytaert et ál. 2007; Crespo et ál. 2010).

El análisis realizado en el apartado 4.2.5: Estimación del servicio ambiental de los sistemas de tratamiento, se muestra que existe una gran diferencia en el servicio ambiental ofrecido por el bosque primario (C) comparado con los sistemas agroforestales A y B, esta diferencia es de 181.85 CO₂e y 241.11 CO₂e, respetivamente. De lo anterior, comparando los sistemas agroforestales, el sistema agroforestal Café – Pacay (A) almacena mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo como servicio ambiental a comparación del sistema agroforestal Café – Pino (B) y esto posiblemente al dosel de la especie asociada al cultivo de café, pues al aumentar la sombra de los árboles aumenta la tasa de fijación de carbono (Andrade et ál. 2014), este beneficio tiene que ser promovido como especie nativa de mayor aporte en carbono orgánico al suelo.

Finalmente, en el apartado 4.2.6: Valoración económica del servicio ambiental de los sistemas de tratamiento, se muestra la valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en cada sistema de tratamiento, destacando entre ellos el sistema de tratamiento C con USD 11,766.57, siendo este valor mucho mayor al sistema de tratamiento A (USD 6,811) y B (USD 5,196.31). Cabe resaltar que para dicha valorización se tomó un precio de mercado señalado por Brent & Robert (2013), quienes indican que USD 27.25 es un precio justo para valorar económicamente un servicio ecosistémico. Por su parte, Trinidad et ál. (2019) asignaron un valor de USD 6.39 por tonelada de CO₂ equivalente, monto obtenido de una evaluación de rentabilidad social de proyectos de inversión pública llevados

a cabo en el territorio peruano en el año 2018 y 2019, al comparar este estimado con el monto calculado, reduciría su valor en un 77%. Por otro lado, durante la 22^a Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la Comisión de Líderes para la Fijación de Precio al Carbono consideró que el precio debe situarse, como mínimo, entre USD 40 y USD 80 por tonelada de CO₂ para 2020 y entre USD 50 y USD 100 por tonelada de CO₂ para 2030, teniendo en cuenta el último rango el valor calculado aumentaría considerablemente, representando de USD 11,766.57 a USD 151,130.42 por hectárea al año. Finalmente, al comparar los sistemas agroforestales (A y B), se observa una diferencia monetaria de USD 1,614.69 a favor del sistema de tratamiento A, básicamente esta diferencia varía en función a la especie asociada al café, y el pacay es la especie que aporta mayor cantidad de materia orgánica en el suelo y por ello su valor económico es mayor al sistema de tratamiento café-pino.

CONCLUSIONES

Del análisis realizado en la presente investigación, se obtiene las siguientes conclusiones:

1. El valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono es mayor en el bosque nativo con USD 11,766.57, así mismo el valor económico del sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pacay (*Inga adenophylla* P.) es de USD 6,810.997 y el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pino (*Pinus tecunumanii* F.) es de USD 5,196.308. Donde inferimos que el valor económico de almacenamiento de carbono es mayor en el bosque nativo que en los sistemas agroforestales de café.
2. La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pacay (*Inga adenophylla* P.) es de 249.944 tCO₂e/ha.
3. La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo del sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) - pino (*Pinus tecunumanii* F.) es de 190.690 tCO₂e/ha.
4. La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo del bosque nativo es de 431.801 tCO₂e/ha, captando en un 45% más que los otros sistemas agroforestales estudiados.

RECOMENDACIONES

1. El gobierno nacional debería comercializar el CO₂e de los sistemas agroforestales, ya que además de tomarse como una alternativa de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático, generaría un ingreso adicional en la economía de los caficultores, por lo que se fomentaría una agricultura sostenible con el medio ambiente. Sin embargo, esta alternativa debe ir acompañado de un fortalecimiento técnico para que así se realice adecuadamente.
2. Luego de haber determinado la cantidad de carbono orgánico en los suelos agroforestales del cultivo de café, es importantes recalcar que al perderse las mismas se contribuirá al incremento de los gases de efecto invernadero; por lo tanto, es de gran valor que los gobiernos locales promuevan sistemas agroforestales de café - pacay ya que aporta mayor contenido de carbono orgánico a los suelos.
3. Que los docentes utilicen los datos obtenidos de esta investigación de la mejor manera para crear bases de datos sobre el almacenamiento de carbono en suelos agroforestales de la zona, y estudiantes para fomentar la importancia de este sistema de producción asociado a la adaptación y mitigación del cambio climático.
4. A futuros investigadores se recomienda que, por la gran potencialidad de almacenamiento de carbono orgánico en suelos agroforestales de café, es viable extender el estudio en la determinación de biomasa aérea para un estudio más amplio del stock de carbono y generar proyecciones económicas más amplias.
5. Al evidenciar que el sistema agroforestal de café asociado con la especie pacay almacena mayor cantidad de carbono comparado con la especie pino, se

recomienda a los agricultores la asociación de diversos cultivos con esta especie.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Alenza-Garcia, J.F. (2011). El nuevo régimen legal del almacenamiento geológico del dióxido de carbono. *Revista de Administración Pública*, 185: 289-232.
- Albrecht, A. y S.T. Kandji (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99:15-27.
- Alvarado, J., Andrade, H., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café en el municipio de Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21–31.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. & Sparks, D.L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235).
- Andrade, H., Marín, L. y Pachón, D. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro* 26(2): 127-132.
- Andrade, H.J., Brook, R., & Ibrahim, M. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*, 308 (1-2), 11-22.
- Aoki, A.M., Ateca, M.R. & H.P. Apezteguía. 2014. Indicadores de calidad de suelo en el centro-norte de Córdoba. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II reunión nacional “materia orgánica y sustancias húmicas”. Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía blanca. Buenos Aires.
- ARES, Elena. (2014). Carbon Price floor.
- Ávila, G. (2000). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 99 p.

- Avilés, I. (2009). Fijación biológica de nitrógeno y almacenamiento de carbono en agrosistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en Puerto Rico. Tesis. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez. 124 p.
- Beare, M. H., McNeill, S. J., Curtin, D., Parfitt, R. L., Jones, H. S., Dodd, M. B. & Sharp, J. (2014). Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study. *Biochemistry*, 120: 71-87.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., y Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, 139–164.
- Benjamín, J. & Masera, O. (2011). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1), 2001:3-12
- Buytaert, Wouter, Vicente Iñiguez, y Bert De Bièvre. 2007. "The Effects of Afforestation and Cultivation on Water Yield in the Andean Páramo." *Forest Ecology and Management* 251 (1-2): 22-30. doi: 10.1016/j.foreco.06.035.
- Cabrales E., Ferrer J., Hernández R. (2011). Fraccionamiento químico de la materia orgánica en tres suelos de la colonia Tovar – Venezuela. *Temas agrarios*, 16 (2): 18 – 27.
- Cardenas, S. (2007). Caracterización morfológica y agronómica del café (*coffea arabica* L.). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica.
- Castro, R. (2017). Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con *Coffea arabica* (L.) en la zona de los santos, costa rica. Tesis para optar por el título de ingeniero forestal con el grado académico de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. escuela de ingeniería forestal. 93 pp.
- Céspedes C. & Millas P. (2015). Relevancia de la materia orgánica del suelo. Chillan: INIA Quilamapu. Boletín INIA – Instituto de Investigaciones agropecuarias.

- Climate Progress. (2013). Shell Oil Self-Imposes Carbon Pollution Tax High Enough To Crash Coal, Erase Natural Gas's Value-Added.
- Corral, R., Duicela, L. y Maza, H. (2006). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. 1-15 pp.
- Crowther, T. W. *et al.* (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540: 104-110.
- Davies, BE. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J. Proc.* 38: 150-151.
- Daza Torres, Martha C., Fanny Hernández Flórez, y Flor Alba Triana. 2014. "Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia." *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 67 (1): 7189-7200. doi: 10.15446/rfnam.v67n1.42642.
- De Moraes Sá, J.C., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hundria, M., Cesar, P. & Carvalho, F. (2017). Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 98: 102-112.
- Dixon, R. (1995). Agroforestry system: Sources or sinks of greenhouse gases. *Agroforestry Systems*, 31, 99–116.
- Echeverri, D. & Cols, C. (2005). Café para Cardiólogos. *Revista Colombiana de Cardiología*, 11(8).
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A., & Torres., A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70.
- FAO (2010). *Forest resources assessment 2010*. FAO Forestry Paper 163. FAO, Rome, Italy.
- FAO & GRIS. (2015). *Status of the World's Soil Resources*, Roma: s.n.

- FAO (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.
- Florida, R., y López, C.S. (2011). Manual del laboratorio de conservación de suelos y agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tinge María, Perú. 41 p.
- Forest Trends (2010). Aprendiendo sobre pagos por servicios ambientales. Fundamentos para la elaboración de proyectos de carbono forestal.
- Giovannucci, D. y Koekoek, F.J. (2003). The State of Sustainable Coffee: A Study of Twelve Major Markets. Edit. Feriva. Cali. Colombia. 199 p.
- Gougoulas, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94: 2362-2371.
- Guzmán, A., Link, A., Castillo, J., y Botero, J. (2016). Agroecosystems and primate conservation: Shade coffee as potential habitat for the conservation of Andean night monkeys in the northern Andes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 215(1):57-67.
- Hofstede, Robert, Jeroen P. Groenendijk, Ruben Coppus, Jan C. Fehse, y Jan Sevink. 2002. "Impact of Pine Plantations on Soils and Vegetation in the Ecuadorian High Andes." *Mountain Research and Development* 22 (2): 159-167. doi: 10.1659/0276-4741(2002)022[0159:IOPPOS]2.0.CO;2.
- Ibrahim, M., Villanueva, C., & Mora, J. (2005). Traditional and improved silvopastoral systems and their importance in sustainability of livestock farms. *Silvopastoralism and sustainable land management*. 13–18.
- ICC (2014). Comercio mundial del café (1963 - 2013). Reseña de los mercados, retos y oportunidades con los que se enfrenta el sector. Londres.
- ICO (2016). Informe del Mercado de Café, 1–5.

- Ingaramo, O.E.; Paz Ferreiro, J.; Mirás Avalos, J.M. & Vidal Vázquez, E. 2007. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña. Vol. 32, pp. 127 – 137.
- INNIS, Michelle; REED, Stanley; y DAVENPORT, Coral. (2014). Australia Tax Repeal Is Big Blow to Fight Against Emissions.
- INRENA (2001). Valoración Económica de la Diversidad Biológica y Servicios Ambientales en el Perú. Lima: Instituto Nacional de Recursos Naturales. 50 pp. 50.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). Climate Change Synthesis Report: A Summary for Policymakers. UK. IPCC. Wembley
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis, Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC.
- Isaza, C., y Cornejo, J. (2015). Café y el ciclo del carbono. Cambio climático y carbono en café.
- Jastrow, J. D., Amonette, J. E. & Bailey, V. L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 80: 5-23.
- Jezeer, R., & Verweij, P. (2015). Café en sistemas agroforestales. Holanda.
- Jiménez, A., & Massa, P. (2015). Producción de café y variables climáticas: el caso Espóndola, Ecuador. *Economía*, 40(2), 117–137.
- Kaiser, K., y Kalbitz, K. (2012). Cycling downwards – dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 52: 29-32.
- Kane, D. (2015). Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices, s.l.: s.n.
- Keestra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella,

- Keiluweit, M., Bougoure, J. J., Nico, P. S., Pett-Ridge, J., Weber, P. K. & Kleber, M. (2015). Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 5: 588–595.
- L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R.D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B. & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2: 111-128.
- León, F. (2007). El Aporte de las Áreas Naturales Protegidas a la Economía Nacional.
- Lorenz, K. & Lal. R. (2005). The Depth Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use and Management and the Potential of Carbon Sequestration in Subsoil Horizons. *Advances in Agronomy*, 88: 35-66.
- Marschner, B., *et al.* (2008). How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 91-110.
- MINAGRI (2017). Boletín estadístico de producción agrícola y ganadera. I Trimestre 2017. Lima.
- MINAM (2015). Manual de valoración económica del patrimonio natural / Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. -- Lima: MINAM: GIZ, 2015. 85 p.: il., col.
- Montagnini, F. y P. Nair (2004). Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61-62(1-3): 281-295.
- Murray, R. M.; Orozco, M. G.; Hernández, A.; Lemus, C.; Nájera, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. Universidad de Colima Colima, México. Vol. 18, pp. 23-31.

Nature Conservancy. (2013). Climate change: What We Do. The Role of Forests in Reducing Emissions.

Núñez, J. 2000b. Fundamentos de edafología. 2ª ed. San José, CR, EUNED. 185 p.

Odar, B. (2018). Evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea spp.*) en el anexo de Vilaya, distrito de Colcamar, provincia de Luya, Amazonas, 2017-2018. Para obtener el título profesional de Ingeniero ambiental. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Nacional Toribio Rodríguez De Mendoza De Amazonas. Perú. 71 pp.

Orozco, G., Ordoñez, C., Suarez, J., & López, C. (2014). Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. Revista de investigación agraria y ambiental, 5(1), 213-221.

Ortiz, A., & Riascos, L. (2006). Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao y laurel en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica.

OSINFOR. Servicios ambientales.

Parry, M., Canziani, J., y Palutikof., E. (2007). Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

Paul, E. (2014). Soil microbiology, ecology and biochemistry. Academic Press. pp. 598.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P. & Smith, P. (2016). Climatesmart soils. Nature, 532(7597): 49-57.

Polzot, C. (2004). Carbon storage in coffee agroecosystems of Southern Costa Rica: Potential applications for the clean development mechanism. Major paper Master in Environmental. Toronto, CA. York University. 162 p.

- Rasse, D., Rumpel, C. & Dignac, M. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1): 341-356.
- Rügnitz, M., Chacón, M. y Porro, R. (2009). Guía para la determinación de carbono, en pequeñas propiedades rurales. Lima, Perú. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) 1 Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p.
- Rumpel, C. & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338(1-2): 143-158.
- Rumpel, C., Chabbi, A. & Marschner, B. (2012). Carbon Storage and Sequestration in Subsoil Horizons: Knowledge, Gaps and Potentials. En: R. Lal et al. eds. *Recarbonization of the Biosphere*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 445-464.
- Rubio A.M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del Parque natural los alcornocales. Proyecto de investigación INTERBOS. Universidad de Sevilla.
- Salazar, A., Saucedo, J., y Méndez, L. (2018). Evaluación de la captura de carbono en suelos de sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en los distritos Mariscal Benavides y Longar, provincia Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería* 1(1): 20-26.
- Sánchez D. (2016). Dinámica del carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Bogotá.
- Schmidt, M. W. I., *et al.* (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49–56.
- Schulte, EE & BG Hopkins. 1996. Estimation of soil organic matter by weight loss-on ignition. *In*: FR Magdoff et al. (eds). *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*. SSSAJ, Madison WI. Pp. 21-31.

- Schimel, D. (1994) Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biochem Cycles*, 8(3):279–293.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. (2006). Bacterial and Fungal contributions to Carbon Sequestration in Agrosystems. *Soil Science Society of America*, 70(2): 555-569.
- Soto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Jimenez, G., & De Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chaipas, Mexico. *Agroforestry systems*. 78, 39-51.
- Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biochemistry*, 86: 19-31.
- Taboada & Álvarez (2008). *Fertilidad Física de los suelos*. Buenos Aires: 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- TCK, The Global Call For Climate Action. (2014). Emissions soar as Australia repeals its carbon tax.
- Thévenot, M., Dignac, M.-F. & Rumpel, C. (2010). Fate of lignins in soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1200-1211.
- Todd-Brown, K. E. O., Randerson, J. T., Hopkins, F., Arora, V., Hajima, T., Jones, C., Shevliakova, E., Tjiputra, J., Volodin, E., Wu, T., Zhang, Q. & Allison, S. D. (2014). Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth System Models during the 21st century. *Biogeosciences*, 11: 2341-2356.
- Trumbore, S. (2009). Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 37: 47-66.
- Umaña, J., y Pulgarín, A. (2013). Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima. *Revista Ciencia animal*, (6), 11-27.
- Van der Wal, A. & De Boer, W. (2017). Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 105: 45-48.

Van Groenigen, K. J., Qi, X., Osenberg, C. W., Luo, Y. & Hungate, B. A. (2014).

Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage. *Science*, 344: 508- 209.

Von Lützow, M., Kögel-Knabner, L., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G.,

Marschner, B. & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.

ANEXO

ANEXO 1: Matriz de consistencia.

ANEXO 2: Instrumentos de recolección de datos.

ANEXO 3: Mapa de ubicación.

ANEXO 4: Fotografías.

ANEXO 1: Matriz de consistencia.

Título: “Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020”.				
Formulación del problema.	Objetivos de la investigación.	Hipótesis de la investigación.	VARIABLES DE ESTUDIO.	Metodología de la investigación.
<p>Problema general</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es la capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020? <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de 	<p>Objetivo general</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar la capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020. <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar la capacidad del servicio ambiental de 	<p>Hipótesis general</p> <ul style="list-style-type: none"> La capacidad y valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo es mayor en el bosque nativo que en los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020. <p>Hipótesis específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> La capacidad del servicio ambiental de 	<p>Variable dependiente</p> <p>Valoración Económica del carbono del suelo en el bosque nativo y sistemas agroforestales de café (<i>C. arabica</i> L.) - pacay (<i>I. adenophylla</i> P.) y café (<i>C. arabica</i> L.) - pino (<i>P. tecunumanii</i> F.).</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>Finalidad: Aplicada. Carácter: Cuantitativo Naturaleza: Experimental.</p> <p>Diseño de la investigación</p> <p>Aleatorizado (DCA). Nivel de confianza del 95% Tres (3) repeticiones.</p>

<p>almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) – pacay (<i>Inga adenophylla</i> P.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) – pino (<i>Pinus tecunumanii</i> F.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020? ▪ ¿Cuál es la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el 	<p>almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) - pacay (<i>Inga adenophylla</i> P.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) – pino (<i>Pinus tecunumanii</i> F.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020. ▪ Determinar la capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el 	<p>almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) - pacay (<i>Inga adenophylla</i> P.) es menor comparado con el bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal de café (<i>Coffea arabica</i> L.) – pino (<i>Pinus tecunumanii</i> F.) es menor comparado con el bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020. 	<p>Variable independiente Almacenamiento de COS.</p> <p>Variable interviniente Selección de la muestra.</p>	<p>Población Área total de cada sistema de tratamiento: sistemas agroforestales de café (<i>C. arabica</i> L.) - pacay (<i>I. adenophylla</i> P.) y café (<i>C. arabica</i> L.) - pino (<i>P. tecunumanii</i> F.); y bosque nativo.</p> <p>Muestra Tres (3) muestras de suelo para determinación de CO y tres (3) muestras de suelo para determinación de DA, en cada parcela.</p>
--	--	---	---	--

<p>bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020?</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco - 2020? 	<p>bosque nativo del distrito de Chontabamba, Oxapampa, Pasco – 2020.</p> <ul style="list-style-type: none"> Valorar económicamente el servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) y bosque nativo del distrito de Chontabamba, Oxapampa, Pasco – 2020. 	<ul style="list-style-type: none"> La capacidad del servicio ambiental de almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el bosque nativo es superior a los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020. El valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono es mayor en el bosque nativo que en los sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i> L.) del distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa, región Pasco - 2020. 		<p>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</p> <p>Matrices de tabulación estructurada.</p> <p>Técnicas de procesamiento y análisis de datos</p> <p>ANOVA y Prueba de Tukey. Programa MS Excel. RStudio.</p> <p>Tratamiento estadístico de datos.</p> <p>Análisis de correlación y regresión. RStudio.</p>
---	---	---	--	--

ANEXO 2: Instrumentos de recolección de datos.

2.1. Porcentaje de materia orgánica del suelo por cada sistema de tratamiento.

Sistema de tratamiento	Profundidad (cm)	Descripción	Repeticiones		
			1	2	3
A	0-10	Peso crisol	17.741	20.370	19.356
		Peso seco	23.245	25.847	24.722
		Peso calcinado	22.982	25.587	24.451
		%MO	4.779	4.747	5.050
	10--20	Peso crisol	18.949	18.198	17.280
		Peso seco	23.998	23.550	22.815
		Peso calcinado	23.767	23.291	22.538
		% MO	4.575	4.839	5.005
	20-30	Peso crisol	20.406	18.870	20.264
		Peso seco	26.193	24.249	25.680
		Peso calcinado	25.989	24.036	25.473
		% MO	3.525	3.960	3.822
C	0-10	Peso crisol	35.387	33.218	35.003
		Peso seco	40.587	38.764	40.319
		Peso calcinado	39.977	38.122	39.699
		% MO	11.723	11.574	11.662
	10--20	Peso crisol	38.763	36.430	37.890
		Peso seco	44.158	42.060	43.258
		Peso calcinado	43.590	41.476	42.697
		% MO	10.525	10.371	10.450
	20-30	Peso crisol	35.446	37.679	35.163
		Peso seco	41.034	43.081	40.304
		Peso calcinado	40.499	42.572	39.809
		% MO	9.575	9.423	9.628
B	0-10	Peso crisol	18.582	22.225	19.026

		Peso seco	24.022	27.284	24.491
		Peso calcinado	23.843	27.127	24.309
		% MO	3.291	3.103	3.330
	10--20	Peso crisol	20.020	20.447	17.939
		Peso seco	25.138	25.483	23.257
		Peso calcinado	24.998	25.369	23.119
		% MO	2.736	2.264	2.595
	20-30	Peso crisol	17.154	19.393	17.812
		Peso seco	22.732	24.421	23.247
		Peso calcinado	22.637	24.346	23.149
		% MO	1.703	1.492	1.803

2.2. Porcentaje de carbono orgánico del suelo por cada sistema de tratamiento.

Sistemas de tratamiento		Profundidad (cm)	MO%	Factor Van Vammelen	CO%		
A	A1	0-10	4.779	1.724	2.772	2.490	2.597
		10-20	4.575	1.724	2.654		
		20-30	3.525	1.724	2.045		
	A2	0-10	4.747	1.724	2.753	2.619	
		10-20	4.839	1.724	2.807		
		20-30	3.960	1.724	2.297		
	A3	0-10	5.050	1.724	2.929	2.683	
		10-20	5.005	1.724	2.903		
		20-30	3.822	1.724	2.217		
C	C1	0-10	11.723	1.724	6.800	6.153	6.118
		10-20	10.525	1.724	6.105		
		20-30	9.575	1.724	5.554		
	C2	0-10	11.574	1.724	6.714	6.065	
		10-20	10.371	1.724	6.015		

		20-30	9.423	1.724	5.466		
	C3	0-10	11.662	1.724	6.765	6.137	
		10-20	10.450	1.724	6.062		
		20-30	9.628	1.724	5.585		
B	B1	0-10	3.291	1.724	1.909	1.494	1.438
		10-20	2.736	1.724	1.587		
		20-30	1.703	1.724	0.988		
	B2	0-10	3.103	1.724	1.800	1.326	
		10-20	2.264	1.724	1.313		
		20-30	1.492	1.724	0.865		
	B3	0-10	3.330	1.724	1.932	1.494	
		10-20	2.595	1.724	1.505		
		20-30	1.803	1.724	1.046		

2.2. Densidad aparente (DA) por cada sistema de tratamiento.

Sistemas de tratamiento		Profundidad (cm)	Peso seco del suelo (g)	Volumen del cilindro (cm ³)	Densidad (g/cm ³)		
A	A1	0 - 10	101.912	120.961	0.843	0.865	0.876
		10 - 20	105.099	120.961	0.869		
		20 - 30	106.991	120.961	0.885		
	A2	0 - 10	99.888	120.961	0.826	0.876	
		10 - 20	108.368	120.961	0.896		
		20 - 30	109.698	120.961	0.907		
	A3	0 - 10	97.599	120.961	0.807	0.888	
		10 - 20	111.581	120.961	0.922		
		20 - 30	112.887	120.961	0.933		
C	C1	0 - 10	74.423	120.961	0.615	0.640	0.643
		10 - 20	77.2	120.961	0.638		

	C2	20 - 30	80.481	120.961	0.665	0.647			
		0 - 10	74.801	120.961	0.618				
		10 - 20	78.41	120.961	0.648				
		20 - 30	81.475	120.961	0.674				
	C3	0 - 10	74.702	120.961	0.618	0.642			
		10 - 20	77.1	120.961	0.637				
		20 - 30	81.181	120.961	0.671				
	B	B1	0 - 10	115.197	120.961	0.952		1.173	1.225
			10 - 20	154.796	120.961	1.280			
20 - 30			155.679	120.961	1.287				
B2		0 - 10	144.024	120.961	1.191	1.274			
		10 - 20	158.378	120.961	1.309				
		20 - 30	159.927	120.961	1.322				
B3		0 - 10	141.989	120.961	1.174	1.227			
		10 - 20	151.016	120.961	1.248				
		20 - 30	152.096	120.961	1.257				

2.3. Carbono orgánico del suelo (COS) por cada sistema de tratamiento.

Sistemas		Profundidad (cm)	%CO	DA (g/cm ³)	Pm (cm)	COS (tC/ha)		
A	A1	0 - 10	2.772	0.843	30	70.061	64.496	68.105
		10 - 20	2.654	0.869	30	69.171		
		20 - 30	2.045	0.885	30	54.257		
	A2	0 - 10	2.753	0.826	30	68.210	68.715	
		10 - 20	2.807	0.896	30	75.444		
		20 - 30	2.297	0.907	30	62.491		
	A3	0 - 10	2.929	0.807	30	70.905	71.104	
		10 - 20	2.903	0.922	30	80.337		
		20 - 30	2.217	0.933	30	62.069		

C	C1	0 - 10	6.800	0.615	30	125.513	117.754	117.657
		10 - 20	6.105	0.638	30	116.888		
		20 - 30	5.554	0.665	30	110.863		
	C2	0 - 10	6.714	0.618	30	124.548	117.324	
		10 - 20	6.015	0.648	30	116.980		
		20 - 30	5.466	0.674	30	110.444		
	C3	0 - 10	6.765	0.618	30	125.327	117.892	
		10 - 20	6.062	0.637	30	115.907		
		20 - 30	5.585	0.671	30	112.443		
CPI	B1	0 - 10	1.909	0.952	30	54.533	51.197	51.959
		10 - 20	1.587	1.280	30	60.918		
		20 - 30	0.988	1.287	30	38.140		
	B2	0 - 10	1.800	1.191	30	64.296	50.065	
		10 - 20	1.313	1.309	30	51.581		
		20 - 30	0.865	1.322	30	34.318		
	B3	0 - 10	1.932	1.174	30	68.025	54.616	
		10 - 20	1.505	1.248	30	56.372		
		20 - 30	1.046	1.257	30	39.450		

ANEXO 3: Mapa de ubicación.

3.1. Mapa de Ubicación de los sistemas agroforestales de café y bosque nativo.

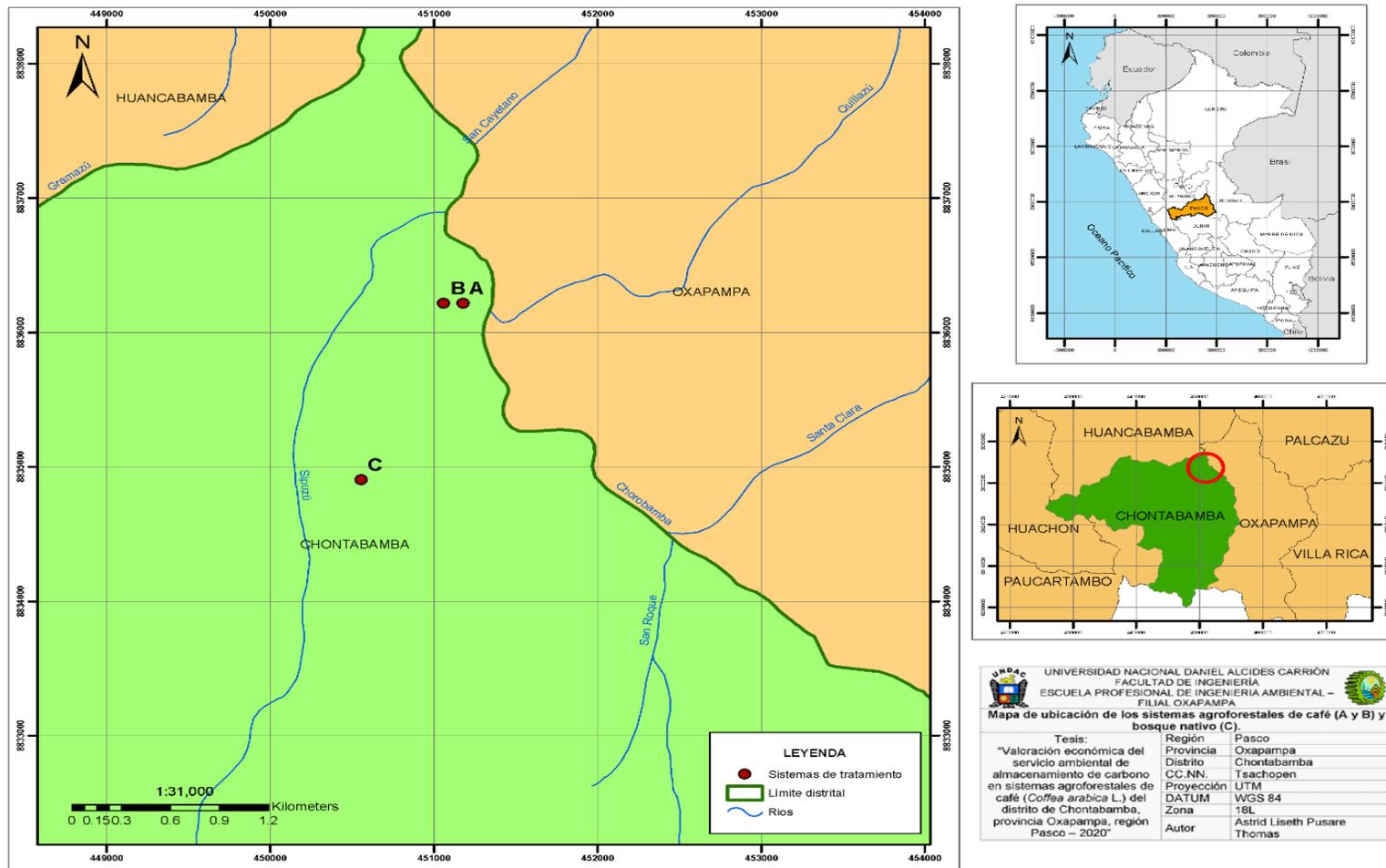


Figura 10. Mapa de ubicación de los sistemas agroforestales de café y bosque nativo.

ANEXO 4: Fotografías del muestreo de suelo.

4.1. Sistema Agroforestal Café – Pacay (A).



Fotografía 1. Sistema agroforestal Café – Pacay.



Fotografía 2. Delimitación de parcela de muestreo.



Fotografía 3. Inserción de los cilindros a diferentes profundidades (10, 20, 30 cm).



Fotografía 4. Preparación de la muestra del suelo sin destruir el material.



Fotografía 5. Muestras de suelo a diferentes profundidades para determinar carbono orgánico y densidad aparente.



Fotografía 6. Parcela de muestreo de suelo luego de extraer las muestras.

4.2. Sistema Agroforestal Café – Pino (B).



Fotografía 7. Sistema Agroforestal Café - Pino.



Fotografía 8. Delimitación de parcela de muestreo.



Fotografía 9. Inserción de los cilindros a diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-30 cm).



Fotografía 10. Extracción del material de suelo para determinar carbono orgánico y densidad aparente.

4.3. **Bosque nativo (C).**



Fotografía 11. Bosque nativo.



Fotografía 12. Delimitación de la parcela de muestreo y extracción de la materia orgánica sobre el suelo.



Fotografía 13. Inserción del cilindro de metal a diferentes profundidades (0 -10, 10-20, 20-30 cm) para muestras de carbono orgánico y densidad aparente.



Fotografía 14. Extracción del material de suelo.

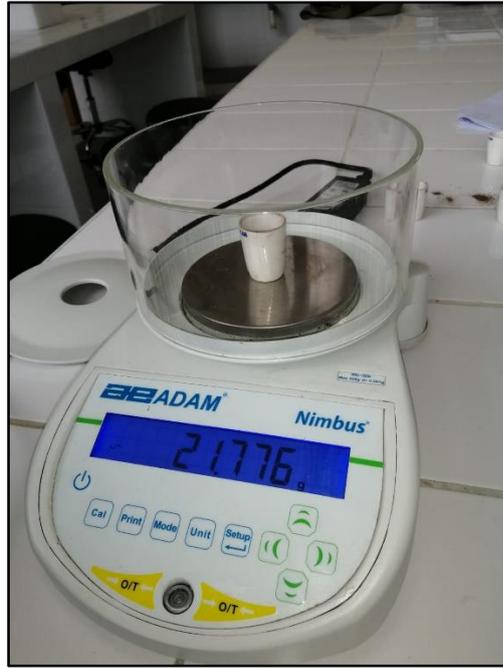


Fotografía 15. Muestras de suelo rotuladas para su posterior análisis de carbono orgánico y densidad aparente.

4.4. Muestras de suelo analizadas en laboratorio



Fotografía 16. Secado de muestras de suelo.



Fotografía 17. Pesado de crisoles con las muestras de suelos.



Fotografía 18. Calcinación de muestras de suelo.



Fotografía 19. Crisoles en el desecador después de haber sido sacado de estufa.