

Captura de carbono en un sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao*) en Victoria, Caldas

Alejandra Díaz Arango

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología
Manizales, Colombia
2022

Captura de carbono en un sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao*) en Victoria, Caldas

ALEJANDRA DIAZ ARANGO

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: **Bióloga**

Director:
César Augusto Duque Castrillón

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología
Manizales, Colombia
2022

Agradecimientos

Principalmente le agradezco al equipo de COLCOCOA, a Fundación Local Partners, Pachamama Consulting, a todo su holding de empresas y a todas las personas que estuvieron en este proceso como lo fue Camilo Morales, Xiomara Valencia, Alejandra Villegas, Jessica Giraldo, Juliana Moreno y Gabriela Álvarez, por todo el apoyo y por la oportunidad que me brindaron para realizar esta investigación; y al laboratorio Terra Forza Lab y a Claudia Ospina por el servicio oportuno de laboratorio para las muestras de suelo. Igualmente, agradezco a Ricardo Benítez el cual hizo un aporte súper valioso respecto al conocimiento compartido. Agradezco a Albany, la cual me acompañó en todo el proceso de medición en la Hacienda La Tentación; y a todo el equipo en la Hacienda por brindarme su hospitalidad y por los cuidados que me proporcionaron mientras realizaba el trabajo. A Joris Weber por su excelente trabajo a la hora de dirigir una metodología que se adaptara a lo que buscábamos, por su profesionalismo al momento de la toma de decisiones y por todo el apoyo que me brindo cuando se requería. Igualmente, agradezco a la Universidad de Caldas y a mi director de trabajo de grado Cesar Duque, por su paciencia y por el conocimiento que me brindó para la realización de este proyecto. Por último, agradezco a mi familia, especialmente a mis padres, y personas cercanas las cuales me apoyaron en todo el proceso.

Resumen

Debido al aumento considerable de los gases de efecto invernadero (GEI), se han buscado soluciones que mitiguen el cambio climático, como bien lo es la captura de carbono. Encontrándose que los principales reservorios de CO₂ son el suelo y la biomasa aérea presente en los árboles. El presente estudio tiene como objetivo la cuantificación de un sistema agroforestal de cacao en Victoria, Caldas.

Para la cuantificación de la biomasa aérea se realizaron parcelas circulares de 1396 m² en cada una en las 3 fases presentes en el estudio. Se escogieron modelos alométricos para la estimación de la biomasa, donde el 'modelo 1' tenía variables de altura, diámetro y el 'modelo 2' tenía de variables la altura, diámetro y densidad de la madera. Para la densidad de la madera se escogieron aleatoriamente árboles que estuvieran fuera de las parcelas y se escogieron 23 especies presentes en la zona de estudio, posterior a ello, mediante la extracción de un core de madera, se estimó la densidad mediante peso seco sobre el volumen. Además, se determinó el contenido de carbono orgánico, para el cual se realizaron parcelas de 0,5 Ha, y se escogieron 4 arreglos agroforestales con 3 muestreos para cada arreglo y mediante método de Walkley y Black se determinó el contenido de materia orgánica.

Los contenidos de biomasa área en promedio fueron 13.06 Ton C Ha⁻¹. Para analizar cómo se distribuyeron los datos se realizó una Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, en las cuales se encontró que los datos no se distribuían normalmente. Mediante una prueba de Kruskal Wallis se encontró que entre las fases existen diferencias significativas y con la prueba Dunn se determinó que la fase 1-2 y 1-3 existen diferencias significativas.

En cuanto al componente forestal, mediante una prueba Mann-Whitney se encontró que es importante en los sistemas con cacao, debido a que aportan gran contenido de carbono.

Por otro lado, el contenido de carbono orgánico en los diferentes arreglos de los sistemas agroforestales analizados es similares.

Se concluye que los sistemas agroforestales son importantes para la mitigación de los efectos negativos al medio ambiente. Por tanto, conocer e incentivar a las familias agricultoras acerca de la importancia de la captura de carbono, es esencial para contribuir positivamente al planeta.

Key words: Sistemas agroforestales, *Theobroma cacao*, Biomasa aérea, Carbono orgánico, Captura de carbono.

Abstract

Due to the considerable increase in greenhouse gases (GHG), solutions have been sought to mitigate climate change, such as carbon sequestration. The main reservoirs of CO₂ are the soil and the aerial biomass present in trees. The objective of this study is the quantification of a cocoa agroforestry system in Victoria, Caldas.

For the quantification of the aerial biomass, circular plots of 1396 m² were made in each of the 3 phases present in the study. Allometric models were chosen for biomass estimation, where 'model 1' had height and diameter variables and 'model 2' had height, diameter and wood density variables. For wood density, trees outside the plots were randomly selected and 23 species present in the study area were chosen, after which, by extracting a core of wood, the density was estimated by dry weight over volume. In addition, the organic carbon content was determined, in which plots of 0.5 Ha were made, and 4 agroforestry arrangements were chosen with 3 samplings for each arrangement.

The average area biomass content was 13.06 Ton C Ha⁻¹. To analyze how the data were distributed, a Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk test was performed, in which it was found that the data were not normally distributed. The Kruskal Wallis test showed that there were significant differences between the phases and the Dunn test showed that there were significant differences between phases 1-2 and 1-3.

The Mann-Whitney test found that the forestry component is important in cocoa systems because it provides a high carbon content.

On the other hand, the organic carbon content in the different arrangements of the agroforestry systems analyzed were similar.

It is concluded that agroforestry systems are important for the mitigation of negative environmental effects. Therefore, knowing and encouraging farming families about carbon sequestration is essential to contribute positively to the planet.

Tabla de contenido

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	7
Materiales y métodos	11
Trabajo en campo	11
Cuantificación de biomasa aérea	11
Resultados	16
Discusión	18
Conclusiones	20
Anexos	21
Referencias bibliográficas	27

Introducción

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más graves que se enfrentan en la actualidad, debido a que implica un aumento en el potencial de la temperatura global del planeta. Hasta el 2015 se estimó que el calentamiento del planeta ascendió $1,1^{\circ}\text{C}$, causando derretimiento de los hielos permanentes, incremento en el nivel del mar, sequías e incendios forestales. Este aumento de temperatura está asociado al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero “GEI” (Benjamín & Masera, 2001).

El aumento de la concentración de los GEI en la atmósfera se ha ido acelerando por ciertas actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. A causa de esto se genera un desbalance y ocasiona un incremento en el calentamiento de la tierra generando el efecto invernadero (Ramachandran et al., 2009; Benjamín & Macera, 2001; Jiménez et al., 2020; FAO, 2000). Los cambios en el uso del suelo afectan los flujos netos de carbono en la atmósfera, estos cambios modifican y, en algunas ocasiones, afectan en contenidos de carbono en los distintos depósitos de este elemento (Benjamín & Macera, 2001).

Algunos de los GEI son el monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y el ozono (O_3). Siendo uno de los principales el dióxido de carbono (CO_2), el cual constituye aproximadamente el 70% del total de las emisiones, mientras que tan sólo cerca del 20% corresponde al CH_4 y un 9% al N_2O (Patiño et al., 2018). Además, el CO_2 es responsable del 50% del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Jobbágy & Jackson, 2000). En el pasado, la agricultura era la principal fuente de emisiones de CO_2 a la atmósfera. Actualmente, el mayor contribuyente es el uso de combustibles fósiles para la industria y el transporte (Hernández et al., 2014). El dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis (Benjamín & Masera, 2001). Mediante la fotosíntesis las plantas convierten la energía de la luz solar en energía química aprovechable para los organismos vivos. De esta manera, los bosques almacenan grandes cantidades de carbono (C) en la vegetación y el suelo, e intercambian carbono (C) con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración (Gayoso & Guerra, 2005).

El carbono es la unidad principal de la vida del planeta y su ciclo es fundamental para el desarrollo de todos los organismos (Bolin y Sukumar, 2000). Se almacena en compartimientos llamados “depósitos” y circula activamente entre ellos. Los océanos son los que almacenan mayor cantidad de carbono, con 38,000 Giga toneladas (Gt = mil millones de toneladas), seguido por el suelo (1,500 Gt), la atmósfera (750 Gt) y las plantas (560 Gt). Cualquier desequilibrio del carbono entre los flujos de entrada y salida se refleja en la concentración del CO₂ atmosférico (Jurado et al., 2019).

La fotosíntesis, junto con la respiración de las plantas, y a la capacidad del suelo para ser un reservorio del carbono, permiten que el CO₂ atmosférico permanezca en equilibrio (Bolin & Sukumar, 2000).-Por lo tanto, la captura del carbono se ha presentado como una de las alternativas para mitigar los efectos de los GEI, manteniéndolo el mayor tiempo posible secuestrado, ya sea en el suelo o en forma de biomasa (Jurado et al., 2019).

Por tanto, para estimar el potencial de carbono de estos sistemas agroforestales se han generado diferentes modelos para la estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea (Brown et al., 1996). Para estimar la biomasa aérea se han creado varios métodos directos e indirectos (IPCC, 1996; Fonseca, 2017). Los modelos directos consisten en cortar el árbol, pesarlo y calcular el peso seco, para posteriormente obtener el contenido de carbono aplicando un factor de conversión (IPCC, 1996).

Mientras que en el modelo indirecto tan sólo se estima mediante ecuaciones. Las ecuaciones alométricas son el método indirecto más usado para la estimación de biomasa aérea. Estas funciones matemáticas basadas en relaciones alométricas, permiten realizar el análisis de las relaciones entre diferentes dimensiones de la planta, usando variables como la altura del árbol (m), diámetro del tronco (cm) y la densidad de la madera (gr/cc) (Álvarez et al., 2013; Fonseca, 2017), las cuales permiten calcular la biomasa de los árboles individuales, para luego sumar los individuos dentro de la muestra y llevarlo a unidades por hectárea y se promedia por muestra. Gran número de modelos alométricos se han construido para diferentes escalas tanto globales, como regionales (Chave et al., 2005).

La selección del método y el modelo apropiado es fundamental para reducir la incertidumbre en la estimación de la biomasa aérea. Por tanto, pese a que el método directo es más preciso a la hora de estimar la biomasa aérea, este es destructivo e implica inversiones altas de tiempo, recursos y mano de obra. Por lo cual, es poco recomendable aplicarlo a escalas regionales o nacionales. Por el contrario, los métodos indirectos son los más usados para la biomasa aérea, debido a su facilidad de estimación, además, implica menos recursos, tiempo y mano de obra, pero es necesario aclarar que es menos preciso al

momento de estimar la biomasa, y depende directamente de la especie del árbol, además de otros factores, como bien lo es el clima (Brown et al. 1996; IPCC, 1996; Fonseca, 2017) Con respecto a los sistemas agroforestales (SAF), se han definido como un sistema de gestión de recursos naturales, dinámico y de base ecológica que, a través de la integración de árboles en las fincas y el paisaje agrícola, diversifica y sostiene la producción para un aumento social, económico y ambiental, beneficiando a los usuarios de la tierra en todos los niveles (Ramachandran et al., 2009). Estos sistemas tienen alto potencial de almacenamiento de carbono (Jurado et al., 2019).

Dentro de las especies importantes de los SAF para estudiar la biomasa aérea se encuentra el cacao, debido a que son importantes sumideros de cantidades considerables de carbono. El cacao es un producto agrícola importante en la economía mundial, proporciona medios de subsistencia para 40-50 millones de personas en todo el mundo. Además de que tienen el potencial de contribuir en la emisión o almacenamiento de carbono dependiendo del modo de producción (Asigbaase et al., 2021). Esta vegetación arbórea provee servicios ambientales importantes como lo son el almacenamiento de carbono tanto en el suelo y en la vegetación, y la conservación de la biodiversidad. Igualmente, contribuye a la reposición de nutrientes del suelo a través de descomposición de la hojarasca, reciclando los nutrientes lixiviados más allá de los árboles de cacao (Salvador et al., 2020; Salvador et al., 2019; Hernández et al., 2021). Asimismo, al permitir una asociación con plantas que proveen sombrero, ya sea perennes o anuales, permite un aprovechamiento del terreno y mejora del equilibrio ecológico (Salvador et al., 2020).

Adicional a la captura de carbono contenido en los SAF, otra manera de mitigar el cambio climático es mediante la fijación del carbono al suelo (Patiño et al., 2018), donde el carbono orgánico del suelo ha sido de gran importancia estudiarlo para combatir el cambio climático, y está fuertemente asociado a ciertos cambios de uso del suelo (Hontoria & Rodriguez, 2004), debido a que es un importante sumidero de carbono o fuente de CO₂. En la materia orgánica, el carbono equivale un 45 - 55%, cumple funciones como fuente y almacén de nutrimentos, adicional a ello participa en la estabilización de la estructura del suelo y el almacén del agua (Galicia et al., 2014)

El estudio de la dinámica del carbono orgánico en los suelos y la composición de materia orgánica en el suelo han sido esenciales para conocer cómo funciona la dinámica de la captura de CO₂ en el suelo. Además, dicho estudio de la dinámica del suelo también se ha visto enriquecido por otras investigaciones en donde se encamina la influencia de diferentes factores que afectan el carbono orgánico como bien lo son el clima, tipo de residuo, la

estructura, textura, la mineralogía, es decir, factores tanto bióticos, abióticos y antrópicos (Galicia et al., 2014; Eyherabide et al., 2014).

De lo cual podemos concluir que, con el fin de mitigar el cambio climático, es necesario controlar las emisiones de GEI a la atmósfera. Por lo cual, la captura de carbono tanto en los árboles como en el suelo son herramientas de importancia trascendental para la lucha mundial contra los efectos catastróficos que trae a los ecosistemas el aumento de estos gases. Debido a lo anterior se planteó la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el contenido de carbono en un sistema agroforestal con cacao?. Por tanto, se plantea el objetivo general: Cuantificar la captura de carbono en un sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao*) en Victoria, Caldas. En cuanto a los objetivos específicos se plantean los siguientes: Determinar la biomasa aérea del sistema agroforestal de Cacao de diferentes edades en Victoria, Caldas; validar la importancia de la variable densidad de la madera en la estimación de la biomasa aérea; evaluar la importancia del componente forestal en el sistema de cacao en la biomasa aérea y cuantificar el carbono orgánico almacenado en el suelo en 4 arreglos del sistema agroforestal.

Materiales y métodos

Área del estudio

El estudio se realizó en Hacienda la tentación, ubicada en el municipio de Victoria, Caldas en el Magdalena Medio, correspondiente a la vertiente oriental de la Cordillera Central. Sus coordenadas geográficas son Latitud 5° 32' 26,86"N, Longitud 74° 50' 26,86"W, con Altitud entre los 250 y 450 msnm.

La Hacienda cuenta con un área total de 310 Ha, distribuidas en 130 hectáreas de cultivo de cacao y 180 hectáreas de bosque de sucesión secundaria, donde estas zonas de cultivo fueron áreas que por décadas fueron usadas como potreros. Presenta condiciones climáticas que lo constituyen como un bosque húmedo tropical, cuenta con una pluviosidad de 2700 mm anual aproximadamente, con tendencia bimodal de lluvias, una temperatura media anual y una variación diaria de 27°C, 13°C y una humedad relativa de 70% - 75%. Con temporadas de lluvia comprendidas entre los meses de abril - mayo; y octubre – noviembre

Los suelos tienen un alto drenaje, son ligeramente ácidos y con deficiencia en ciertos nutrientes. Tradicionalmente empleados para la ganadería extensiva, estaban cubiertos por praderas de pastos nativos.

Trabajo en campo

Quantificación de biomasa aérea

Para cuantificar la biomasa contenida en el sistema agroforestal de cacao se escogieron 3 diferentes estratificaciones presentes en la Hacienda La Tentación en función a los diferentes sistemas de plantación y estados de desarrollo (Figura 1).

Fase 1: Sistema agroforestal de cacao con año de establecimiento del 2014 y un área de 43 ha.

Fase 2: Se encuentra establecido con un sistema agroforestal de cacao, principalmente, con regeneración natural, con año de establecimiento del 2014 y un área total de 47 ha.

Fase 3: Está establecido con un sistema agroforestal de cacao, con año de establecimiento del 2016 con un área de 50 ha.

El diseño de las parcelas depende de variables como lo son la densidad de árboles, propósito de la muestra, recursos, experiencia, sistema de plantación, topografía del sitio, entre otros (Yepes et al., 2011). Por tanto, se realizaron 45 parcelas en las 3 fases y cada parcela tenía un área 1396 m² (Weber, 2020), estas parcelas tenían un diseño circular, porque permite un mayor grado de confiabilidad, además porque puede requerir menor tiempo de establecimiento, debido a que solo requiere un árbol focal (Rodríguez, 2013; Walker et al., 2018).

Las parcelas tenían un diseño de una parcela interna y otra externa. Donde la parcela interna tenía un radio de 10 m es decir un área de 314 m², y solo se medían arboles con una circunferencia de ≥ 10 cm y una parcela externa de radio de 20 m con un área total de 1082 m², en las cuales se medían arboles ≥ 50 cm de circunferencia, (figura 2). El círculo interno y externo tenían el fin de que principalmente los árboles de cacao fueran medidos en la parcela interna y los árboles de sombrero fueran medidos en la parcela externa.

Para definir el área de muestreo se escogió aleatoriamente mediante Qgis (2020), con la herramienta “Puntos aleatorios en los límites de las capas”.

Para cuantificar la biomasa aérea se midieron variables como la altura, el diámetro del tronco y la densidad de la madera (DM). La circunferencia de los árboles sombra fue medida a un diámetro a la altura del pecho. Es decir, de 1,30 m y para árboles de cacao a una altura de 30 cm (Somarriba et al., 2013; Andrade et al., 2008). En cuanto a la altura, es la variable que menos precisión tiene, ya que esta no es incluida en algunas ecuaciones (Concha et al., 2003).

La DM es un rasgo expresado mediante el resultado del peso seco de una pequeña extracción leñosa interna de la planta, dividido por el volumen de la misma muestra saturado de agua. Este rasgo depende tanto de las especies de plantas, como de la edad de los árboles y también depende de factores ambientales (Chave et al., 2006; Álvarez et al., 2013).

Para determinar DM se realizó mediante la extracción de muestras internas con un barrenador de Mattson de 10” y de 5.15 mm de diámetro. Se tomó a 23 especies que se habían encontrado en las parcelas y se escogieron árboles que estuvieran fuera de las parcelas de estimación de biomasa y que tuvieran condiciones similares, es decir, en diámetro y altura

las cuales se tomaron a cada árbol. Para obtener el núcleo de madera se removió primero la corteza muerta y los musgos que podían estar presentes en el tronco, y se procedió a extraer la muestra con el barrenado de Mattson a la altura del pecho. Los núcleos de madera fueron rotulados y empacados en bolsas herméticas y transportados a el laboratorio de botánica de la Universidad de Caldas para conocer su densidad. En el laboratorio, los núcleos fueron sumergidos en agua durante media hora para garantizar una adecuada hidratación, para posteriormente determinar el volumen fresco. El volumen se determinó mediante el método del desplazamiento del agua, este método consiste en sumergir el núcleo en un recipiente con agua sobre una balanza semianalítica (0.001 g).

El núcleo debe estar completamente sumergido con ayuda de una aguja fina cuyo volumen sea despreciable y la muestra de madera no puede estar en contacto con los lados o el fondo del recipiente (Chave, 2005). Por último, las muestras fueron secadas en un horno a 70°C durante 72 horas y pesadas inmediatamente después de ser sacadas del horno. La DM se obtuvo como el peso seco/volumen (g/cm³).

Para las demás especies DM se obtuvo de la Base de Datos Global de Densidad de la Madera (Zanne et al., 2009) con los datos suministrados para la región de Suramérica y de la base de datos del ICRAF “Atributos Funcionales de los Árboles y Base de Datos Ecológica” (db.worldagroforestry.org). Para aquellas especies que no aparecían en la base de datos su densidad, se tomó un factor de 0,6 (Brown, 1997).

Para la estimación del carbono, se realizó mediante la multiplicación de la biomasa total por la fracción de carbono de 0,5 este dato es estándar por el IPCC (2003); y para determinar la tasa de fijación de carbono promedio, se calcula dividiendo el almacenamiento de carbono en biomasa total entre la edad del componente leñoso. Para transformar el carbono a CO₂eq, este se multiplica por el factor estequiométrico 3,67 (Patiño et al., 2018).

Por otro lado, para estimar el carbono orgánico del suelo se empleó mediante el análisis de 4 arreglos agroforestales:

- Cacao- Melina (*Gmelina arborea*)
- Cacao- Balso (*Ochroma pyramidale*)
- Cacao- Abarco (*Cariniana pyriformis*)
- Cacao- Eucalipto pellita (*Eucaliptus pellita*)

Se realizaron 3 muestreos por cada arreglo agroforestal, estos arreglos agroforestales se seleccionaron debido a que eran los más comunes y establecidos en la Hacienda, con el fin de establecer si el componente forestal influía en el carbono orgánico contenido en el

suelo. La extracción de muestras fue mediante un barreno helicoidal, a una profundidad de 20 cm, la cual, a esta profundidad es donde se presenta la mayor formación radicular (Bojorquez et al., 2015). Por tanto, se presenta una mayor acumulación de materia orgánica. Se realizaron parcelas rectangulares de 0,5 ha, de las cuales se tomaron 10 submuestras, en zigzag (Figura 3). Posteriormente, se homogeneizaron las submuestras, y se pesó 1 Kg de la muestra. La muestra obtenida se rotuló y fue llevada a el laboratorio de suelos para obtener los datos de porcentaje de carbono orgánico.

Por último, para el análisis de muestras se cuantificó el porcentaje de carbono orgánico mediante el método de Walkley & Black (método de oxidación húmeda), el cual consiste en la oxidación húmeda de la muestra del suelo con dicromato de potasio en un medio ácido. La oxidación parcial del carbono se produce debido a el calor despendido del ácido sulfúrico. En este proceso se da una reducción del dicromato, el cual posteriormente es titulado con sal ferrosa (Eyherabide et al., 2014).

Análisis de datos

Se usaron ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa aérea (BA) específicas para cada especie, las restantes se usaron modelos generales. Se realizó una comparación entre dos modelos, un modelo específico (Modelo 1) para cada especie que tienen variables altura y diámetro (Biomasa), con respecto a un modelo general (Modelo 2) que tiene como variables altura, diámetro y densidad de la madera (Biomasa con densidad de la madera) (Tabla 1).

Para analizar la normalidad de los datos, se usó una prueba de Kolmogorov-Smirnov y una prueba de Shapiro-Wilk, entre los dos tipos de modelos (modelo 1 y modelo 2) y entre en las diferentes fases presentes en la zona de estudio. Además, para determinar si había diferencias significativas entre la biomasa aérea entre las diferentes fases presentes en la Hacienda, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis, en el paquete estadístico SPSS versión 28. Adicional, para saber entre que fases había diferencias significativas se realizó una prueba de Dunn en RStudio.

Para saber si por componente forestal o cacao existen diferencias significativas, se aplica una prueba Mann-Whitney.

Carbono orgánico

Para comparar si había diferencias significativas entre los 4 sistemas agroforestales de Cacao evaluados, se realizó un ANOVA para medias independientes en un diseño en bloques. Los análisis se realizaron en el programa de R versión 4.1.2.

Resultados

Biomasa aérea y carbono

Se determinó la biomasa aérea mediante las ecuaciones alométricas de los modelos 1 y 2 (Gráfico 1) en las diferentes fases de la zona de estudio para un total de 29.783 árboles medidos y cuantificados en las diferentes parcelas elaboradas en campo. Donde se encontró que en promedio las parcelas capturan 47.959 Ton de CO₂, lo que equivale a 26.136 Ton de biomasa por hectárea, y 13.06 Ton C Ha⁻¹ (Tabla 2).

Se cuantificó el contenido de biomasa en cada una de las fases por componente forestal y cacao, en los cuales se encontró que el contenido de un árbol de cacao en promedio de biomasa aérea en HLT, es de 7,53 Kg a los 6 años de edad; y un árbol forestal en promedio tiene contenidos de biomasa de 279,66 Kg (Gráfico 2).

Mediante el análisis de Kruskal-Wallis se rechaza la hipótesis nula de que la distribución de biomasa en las diferentes fases es la misma, es decir, si existen diferencias significativas entre la biomasa de las 3 fases del estudio. Con el fin de poder corroborar los resultados del anterior análisis se realiza prueba Dunn para conocer qué fases presentan diferencias significativas. Encontrándose que en las fases 1-2 y 1-3 existen diferencias significativas en la biomasa estimada, con respecto a las 2-3 en las cuales no existen diferencias significativas (Tabla 3).

Por otro lado, se evaluó la importancia del componente forestal en el sistema de cacao en la biomasa aérea. Donde primero se realizó una prueba de normalidad de los datos mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk y se encontró que no tenían una distribución normal. Se aplicó prueba de Mann-Whitney del resultado de la biomasa del modelo 1 sin densidad de la madera por categoría de componente forestal y cacao, donde se evidencia que existen diferencias significativas (Gráfico 3). Además, también se realizó dicha prueba para el modelo 2 con la variable densidad de la madera por categoría de componente forestal y cacao (Gráfico 4).

Densidad de la madera

Para determinar los contenidos de biomasa del modelo 2 se utilizaron ecuaciones alométricas, en las cuales una de las variables usadas fue la densidad de la madera, la cual se determinó para 23 especies encontradas en las diferentes fases presentes en la zona de estudio, y halladas dentro de las parcelas y la desviación estándar obtenida (Tabla 4).

Para validar la importancia de la variable densidad de la madera en la estimación de la biomasa aérea, primero se analizó si los datos se distribuyen normalmente con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, donde se encontró que los datos con los dos tipos de modelos de ecuaciones usadas para determinar la biomasa de los árboles en las diferentes fases de la zona de estudio no presentan una distribución normal. Luego, se realizó una prueba de correlación entre los dos tipos de modelos de ecuaciones donde se encontró que existe una relación del 95% entre las ecuaciones (Tabla 5).

Carbono en suelo

Al comparar el carbono orgánico almacenado en el suelo en los cuatro arreglos del sistema agroforestal, se encontró que no había diferencias significativas. Es decir, los cuatro arreglos agroforestales captan un porcentaje similar de carbono orgánico del suelo (Gráfico 5).

Discusión

En el estudio realizado se encontró que aproximadamente en un sistema agroforestal de cacao, entre la edad de 5-7 años, tiene contenidos de biomasa aérea de 26.136 Ton Ha⁻¹, lo que corresponde dentro los rangos reportados de Espinoza, Vásquez, y Torres (2012) dentro de un estudio que realizaron en México en regiones semiáridas, subhúmedas, húmedas y templadas, en el cual encontraron que los sistemas agroforestales almacenan aproximadamente 9, 21, 50 y 63 t C ha⁻¹ de biomasa aérea. En otros estudios como lo fue el de Marín et al. (2016) se estimó almacenamiento en Sistemas agroforestales de cacao en el departamento de Tolima de 19 Ton C ha⁻¹. un poco mayor si se le compara con el resultado del estudio realizado en a Hacienda La tentación, el cual dio un promedio de 13,068 C Ton Ha⁻¹.

En el estudio se encontró que el componente forestal es clave para los cultivos de cacao, por cuanto proporcionan una mayor cuantificación de la biomasa aérea. En Indonesia, Rajab et al. (2016) encontraron que existe un aumento de cinco veces en el contenido de carbono en los sistemas de cacao biodiversos de árboles, en comparación con los monocultivos de cacao. Por tanto, el sistema agroforestal es clave para el secuestro de carbono y estimación de la biomasa en plantaciones de cacao. Por ende, los sistemas agroforestales contribuyen a la mitigación de los impactos negativos en el medio ambiente, ya que evita los efectos nocivos de los monocultivos permitiendo la integración de árboles que sean benéficos para el suelo y para el ambiente. Adicional, el componente forestal proporciona un beneficio social y económico a las familias agricultoras, ya que aporta un ingreso económico extra en la explotación de los cultivos (Hernández et al., 2021).

Pese a que la correlación entre los dos modelos de ecuaciones dio correlaciones altas, no es posible inferir con esto si la variable densidad de la madera es importante seguirla incluyendo en sus estimaciones, pese a que algunos autores reconocen la importancia de esta variable, debido a que esta variable se correlaciona con las propiedades morfológicas y fisiológicas del árbol. Además, hacen referencias de que, pese a que La DM es un atributo variable según las condiciones climáticas, edad del árbol, diferencias genéticas, disponibilidad de nutrientes y altitud (Ordoñez et al., 2015), es una de las variables que mejor explican el contenido de biomasa puesto que es un atributo de la madera (Brown et al., 1997; Chave et al., 2005). Por tanto, una estimación adecuada de la biomasa permite tener mayor certidumbre para estimación de CO₂.

Por otro lado, el contenido de carbono orgánico de los cuatro sistemas agroforestales es



bajo, lo cual puede ser explicado por la historia del uso del suelo, el cual era principalmente era con fines de explotación ganadera, y por el tipo de suelo. Aunque también se puede deber a otros factores como bien lo son el clima, la altitud, entre otros (Alvarado et al., 2013). Por tanto, el suelo y los árboles juegan un papel fundamental como medio importante para capturar y almacenar el CO₂ atmosférico, ya sea mediante biomasa área, subterránea y necromasa (Mena y Andrade, 2021). Debido a que los árboles son importantes sumideros de carbono y cumplen un papel fundamental en la mitigación del cambio climático y de las emisiones de CO₂.

Conclusiones

Tanto la biomasa aérea, como el carbono en el suelo, son componentes que ayudan a la disminución de GEI, y es importante socializar a los agricultores los beneficios que aportan estos sistemas.

Adicional, es importante destacar que un buen manejo del cultivo está directamente relacionado con un crecimiento óptimo de la planta. Por ende, se va a ver reflejado en un mayor contenido de biomasa aérea.

Un suelo saludable tiene mayor capacidad de captura de carbono y es uno de los sumideros más importantes debido a su capacidad de retención por periodos prolongados de tiempo. Por tanto, es importante realizar prácticas de ganadería regenerativa, donde el desgaste del suelo sea mínimo, lo que genera una pérdida de menor materia orgánica en el suelo. Además, se puede concluir que el componente forestal es esencial en los sistemas agrícolas, ya que aporta gran contenido de carbono y contribuye positivamente al ambiente y en la economía de las familias agricultoras.

Anexos

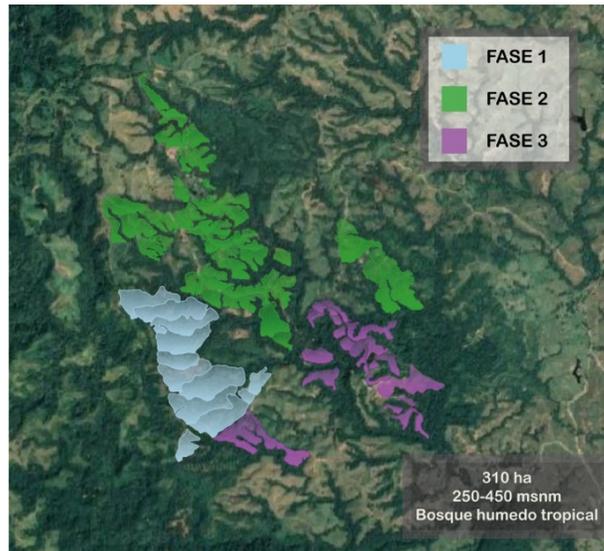


Figura 1. Diseño de parcelas para mediciones de biomasa en Hacienda La Tentación.

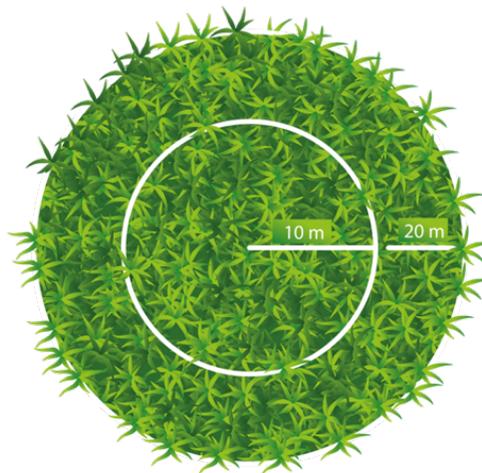


Figura 2. Diseño de parcelas para mediciones de biomasa en Hacienda La Tentación.

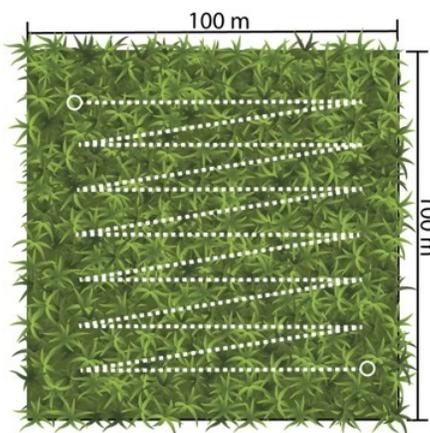


Figura 3. Diseño del muestreo para extracción de muestras de suelo en forma de zigzag.

	Especie	Ecuación	Autor
Modelo 1'	<i>Cordia alliodora</i>	$\log BA = -0,755 + 2,072 \cdot \log(D)$ $10^{(-0,755 + 2,072 \cdot \log(D))}$ $BA = 0,525 + 0,015 D^2 H$	(Segura, Kanninen y Suárez, 2006) Cole & Ewel (2006)
	<i>Hevea Brasiliensis</i>	$\log BA = 56,74 - 13,14(D) + 0,96(D)^2$	(Hernández, 2014)
	<i>Gmelina arborea</i>	$\log BA = -1,988 + 2,993 \cdot \log(D)$	(Rodríguez, 2013)
	<i>Theobroma cacao</i>	$BA = 10^{(-1,625 + 2,63 \cdot \log(D30))}$	(Andrade, Segura, Somarriba y Villalobos, 2008)
	<i>Eucaliptus sp</i>	$BA = 1.22 D^2 H 0,01$	(Senelwa & Sims, 1998)
	<i>Acacia mangium</i>	$BA = 0,2040 D^2,2801$	(Laguado, 2004)
	Diferentes especies	$\log_{10}(BA) = -0,834 + 2,223(\log_{10}D)$	(Álvarez et al., 2013)
Modelo 2'	Ecuación para diferentes especies con variable densidad de la madera	$Ba = \exp(-2,857 + 2,081 \cdot \ln D + 0,587 \cdot \ln AI + 0,453 \cdot \ln Dm)$	(Álvarez et al., 2013)

Tabla 1. Modelos alométricos usados para la estimación de biomasa aérea (BA). Las variables son: diámetro a la altura del pecho (D), diámetro a los 30 cm para arboles de cacao (D30), la altura (H) y densidad de la madera (DM).

Fase	Suma de Biomasa (Ton) (Modelo 1)	C Ton (Modelo 1)	CO2 Ton (Modelo 1)	Suma de Biomasa (Modelo 2) (Ton)	C Ton (Modelo 2)	CO2 Ton (Modelo 2)
1	97.2850557	48.6425279	178.518077	79.4189597	39.7094799	145.733791
2	51.3162673	25.6581337	94.1653505	55.1265457	27.5632729	101.157211
3	37.9764221	18.9882111	69.6867346	32.1169572	16.0584786	58.9346165
Total general	186.577745	93.2888725	342.370162	166.662463	83.3312315	305.82562

Tabla 2. Estimación de biomasa y conversión a carbono y CO₂ en las diferentes fases presentes en el área de estudio.

Kruskal-Wallis	Comparación entre fases		P valor
	1-2		0.000287
	1-3		0.00000000055
	2-3		0.037

Tabla 3. Prueba Kruskal-Wallis comparando entre las fases para determinar si existen diferencias significativas entre ellas.

Nombre común	Nombre científico	DM	Desvest
Melina	<i>Gmelina arborea</i>	0,43140077	0,03793534
Guayacán rosado	<i>Tabebuia rosea</i>	0,551475371	0,04081964
Arrayan	<i>Myrtaceae</i>	0,536711662	0,10375513
Laurel	<i>Nectandra cuspidata</i>	0,54170178	0,02792257
Aguacate	<i>Persea americana</i>	0,569178902	0,03742649
Balso	<i>Ochroma pyramidale</i>	0,340463349	0,10596479
Pelamanos	<i>Daphnopsis cestrifolia</i>	0,531063227	0,08112581
Chicalá	<i>Tecoma stans</i>	0,609091414	0,09553823
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	0,407613363	0,11644034
Nogal	<i>Cordia alliodora</i>	0,47441923	0,08156263
Chingalé	<i>Jacaranda copaia</i>	0,333479885	0,07566101
Pomo	<i>Syzygium jambos</i>	0,482498778	0,02258861
Churimo	<i>Inga semialata</i>	0,592451132	0,20258861
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i>	0,546143462	0,09162974
Totumo de monte	<i>Grias haughtii</i>	0,591719836	0,1008125
Yarumo	<i>Cecropia peltata</i>	0,214526028	0,08030624
Abarco	<i>Cariniana pyriformis</i>	0,505053069	0,16359095
Nigüito	<i>Leandra subseriata</i>	0,525236625	0,0437171
Solera	<i>Cordia gerascathus</i>	0,5294564	0,1409279
Carbonero	<i>Albizia carbonaria</i>	0,606747867	0,0775964
Zurrumbo	<i>Trema micrantha</i>	0,428571055	0,0207538
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	0,479951671	0,0294264
Limón	<i>Citrus limon</i>	0,621102832	0,0354114

Tabla 4. Densidad de la madera (DM) en las diferentes fases presentes en la zona de estudio, y encontradas dentro de las parcelas con la respectiva desviación estándar (desvest).

Correlaciones

		Biomasa (Kg)	Biomasa (con densidad de la madera) (kg)
Biomasa (Kg) 'Modelo 1'	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	1 1516	,955** ,000 1516
Biomasa (con densidad de la madera) (kg) 'Modelo 2'	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,955** ,000 1516	1 1516

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Tabla 5. Prueba de correlación de Pearson entre los modelos de ecuaciones con y sin la variable densidad de la madera.

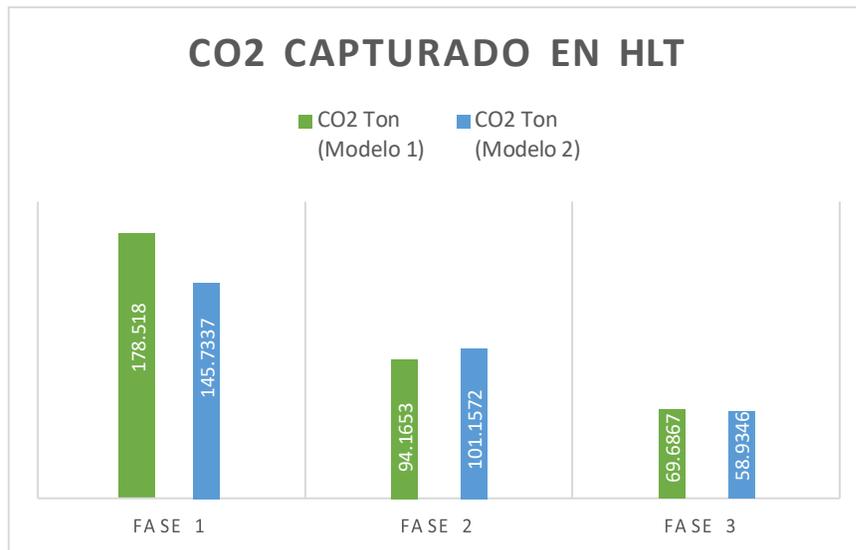


Gráfico 1. CO2 capturado en las diferentes fases presentes del área de estudio.

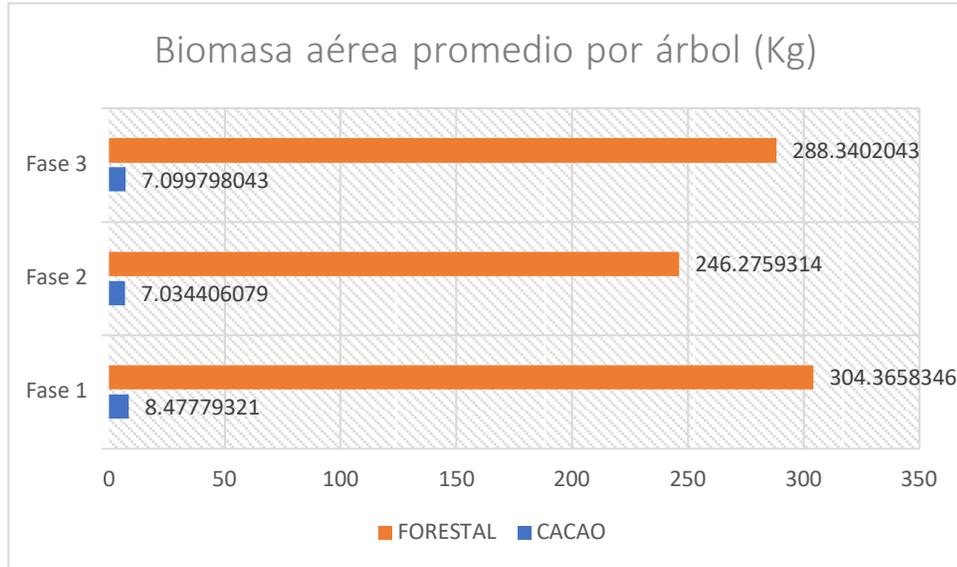


Gráfico 2. Contenido de biomasa en promedio de un árbol de cacao y un árbol forestal en HLT.

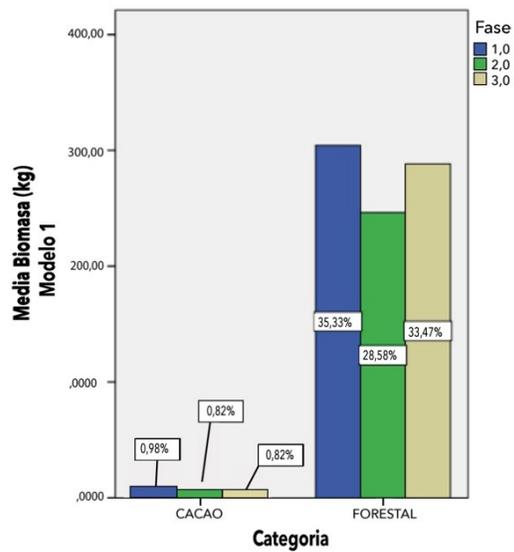


Gráfico 3. Prueba de Mann-Whitney del contenido de biomasa con el 'modelo 1' sin densidad de la madera y categoría de componente forestal y cacao.

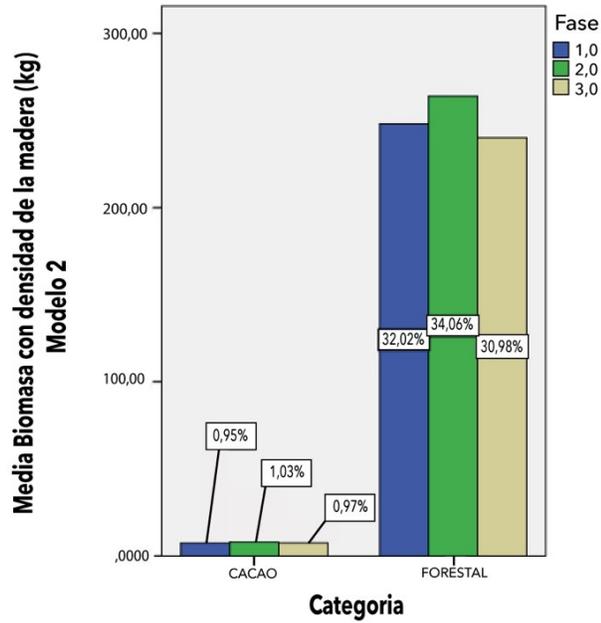


Gráfico 4. Prueba de Mann-Whitney del contenido de biomasa con el 'modelo 2' con la variable densidad de la madera y categoría de componente forestal y cacao.

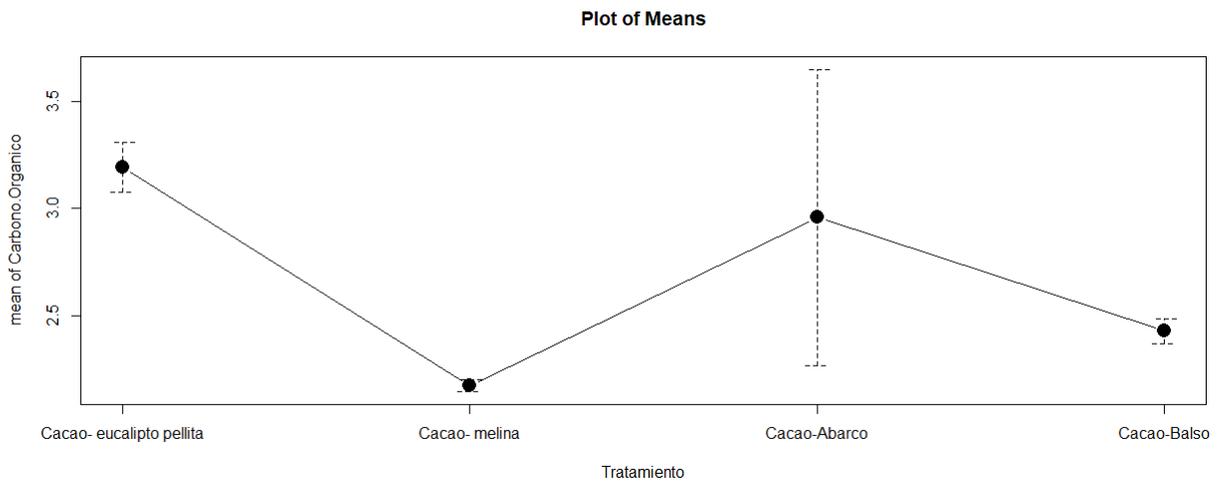


Gráfico 5. Carbono orgánico de los 4 arreglos agroforestales en la Hacienda La tentación.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, J., Andrade, H. J., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia forestal*, 16(1), 21-31.
- Álvarez, E., Benítez, D., Velásquez, C., & Cogollo, A. (2013). Densidad básica del fuste de árboles del bosque seco en la costa Caribe de Colombia. *Intropica*, 8(1), 17 - 28.
- Asigbaase, M., Dawoe, E., Lomax, B. H., & Sjoergersten, S. (2021). Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests, Ghana. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 306, 107192.
- Benjamín, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*, 7(1), 3-12.
- Bolin, B. and Sukuman. (2000). "Global Perspective" Chapter 1 in Watson, R.T., I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo and D.J. Dokken (eds): 2000, *Land Use, Land-use Change, and Forestry*, Published for the Intergovernmental Panel for Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, pp .
- Brown S (1996) Present and potential roles of forests in the global climate change debate. *Unasylva* 185: 3-10.
- Brown S (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. *Forestry Paper* N° 134. FAO. Roma, Italia, 55 pp.
- Chave, J. (2005). *Measuring wood density for tropical forest trees. A field manual for the CTFS sites*. Toulouse, France, 1-7.
- Chave, J., Muller-Landau, H. C., Baker, T. R., Easdale, T. A., Steege, H. T., & Webb, C. O. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological applications*, 16(6), 2356-2367.
- Concha, Daniel & Krishnamurthy, L. & Alegre, Julio. (2002). Secuestro de Carbono por Sistemas Agroforestales Amazónicos. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. VIII. 101-106.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.
- FAO. (2000). *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro*

de CO₂. Rome: World Soil Resources Reports 88.

- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91-109.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33-38.
- Hernández-Núñez, Héctor-Eduardo, Andrade, Hernán-J., Suárez-Salazar, Juan-Carlos, Sánchez-A., José-R., Gutiérrez-S., David-R., Gutiérrez-García, Gustavo-Adolfo, Trujillo-Trujillo, Edwin, & Casanoves, Fernando. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Hernández, J. E., Tirado, D., & Beltrán, I. (2014). Captura de carbono en los suelos. *Padi Boletín científico del ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
- Hontoria, C., Rodríguez-Murillo, J. C., & Saa, A. (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España Peninsular. *Edafología*, 11(2), 149-157.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, & Houghton, J. T. (1996). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Greenhouse Gas Inventory Workbook. OECD.
- IPCC. (2000). Land use, land-use change, and forestry special report. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Jiménez, J. O., Llanos, R. O., & Ticllasuca, A. A. (2020). Captura de Carbono: Un enfoque sobre el cambio climático y los servicios ecosistémicos en el Perú. *Alpha Centauri*, 1(2), 02-14.
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Jurado Riascos, M. A., Ordoñez Jurado, H. R., Ballesteros Possú, W., & Delgado Vargas, I. A. (2019). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño—Colombia.
- Marín, M.P., Andrade, H.J. y Sandoval, A.P. (2016). Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 19 (2), 351-360.

- Mena-Mosquera, V. E., & Andrade C., H. J. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en bosques y sistemas agroforestales concacao en el Pacífico.
- Ordoñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21(SPE), 77-216.
- Patiño, s., Suarez, I. n., Andrade, h. j., & Segura, m. a. (2018). capture of carbon in biomass in forestry plantations and agroforestry systems in armero-guayabal, tolima, colombia/captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en armero-guayabal, tolima, colombia. *revista de investigación agraria y ambiental*, 9(2), 121+.
- Rajab Y, Leuschner C, Barus H, Tjoa A, Hertel D (2016) Cacao Cultivation under Diverse Shade Tree Cover Allows High Carbon Storage and Sequestration without Yield Losses. *PLoS ONE* 11 (2): e0149949. doi:10.1371/journal.pone.0149949
- Ramachandran Nair, P. K.; Mohan Kumar, B.; Nair, Vimala D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10–23. doi:10.1002/jpln.200800030
- Rodríguez Santos, N. (2013). Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación.
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L. D. C., Martínez-Sánchez, J. L., Sánchez-Hernandez, R., & Valdés-Velarde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y bosques*, 25(1).
- Salvador-Morales, P., Martínez-Sánchez, J. L., Cámara Cabrales, L., & Zequeira Ramos, C. (2020). Structure and specific carbon in a chronosequence of *Teobroma cocoa* L. agroforestry systems in Tabasco, México. *Madera y bosques*, 26(3).
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., & Astorga, C. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 173, 46-57.
- Walker S, Pearson T, Casarim F, Harris N, Petrova S, Grais A, Swails E, Netzer M, Goslee K, Brown S, Sidman G, 2018.
- Weber, J. (2020). Bern University of Applied Sciences - BFH. Biomass measurements at Hacienda La Tentacion October – November 2020.