



Artículo original / Original article

## Reservas de carbono en cuatro sistemas agroforestales combinadas con *Theobroma cacao* L., Madre de Dios

### Carbon stocks in four agroforestry systems combined with *Theobroma cacao* L., Madre de Dios

Oliver Surco-Huacachi <sup>1\*</sup> ; Jorge Santiago Garate-Quispe <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Gobierno Regional de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

<sup>2</sup> Universitat de Barcelona, Barcelona, España

Recibido: 01/11/2021

Aceptado: 15/12/2022

Publicado: 25/01/2022

\*Autor de correspondencia: [oliver\\_surco@yahoo.es](mailto:oliver_surco@yahoo.es)

**Resumen:** El objetivo del estudio fue cuantificar el carbono en sistemas agroforestales combinadas con cacao (*Theobroma cacao*) en cuatro distritos de Madre de Dios. Se midió el carbono del suelo, hojarasca y vegetación, mediante metodologías aceptadas por el ICRAF. Para ello, se evaluaron cuatro sistemas agroforestales con cacao en diferentes edades (8, 10, 12 y 15 años). Se utilizaron ecuaciones alométricas para estimar el contenido de biomasa aérea y el carbono almacenado. El sistema con mayor acumulación de carbono aéreo fue la parcela con cacao de 12 años (131,83 t/ha), con *Bertholletia excelsa* (castaña), *Jacaranda copaia* (achihua) y *Schizolobium parahyba* (pashaco). El cacao con un distanciamiento de 5 m × 5 m y las demás especies tuvieron un distanciamiento de 10 m × 10 m. Se concluye que las diferentes edades del sistema agroforestal combinado con cacao presentan distintos niveles de almacenamiento de carbono total.

**Palabras clave:** biomasa sobre el suelo; ecuaciones alométricas; secuestro de carbono; sistemas agroecológicos

**Abstract:** The objective of the study was to quantify carbon in agroforestry systems combined with cacao (*Theobroma cacao* L.) in four districts of Madre de Dios. Soil carbon, litter, and aboveground biomass were measured using methodologies accepted by ICRAF. Four agroforestry systems with cacao were evaluated at different ages (8, 10, 12 and 15 years). Allometric equations were used to estimate the aerial biomass content and the stored carbon. The system with the highest aboveground carbon accumulation was the plot with 12-year-old cocoa (131.83 t/ha), with *Bertholletia excelsa* (Brazil-nut), *Jacaranda copaia* (achihua) and *Schizolobium parahyba* (pashaco). Cocoa with a spacing of 5 m × 5 m, and the other species had a spacing of 10 m × 10 m. It is concluded that the different ages of the agroforestry system combined with cocoa present different levels of total carbon stock.

**Keywords:** agroecological systems; allometric equations; carbon sequestration; above-ground biomass

## 1. Introducción

En Madre de Dios, la deforestación por parte de los pequeños agricultores es muy frecuente, y se caracteriza el desbroce y posterior quema de zonas de bosque naturales con potencial forestal (Decuyper et al., 2022). La actual intensificación de las prácticas agrícolas está provocando una degradación insostenible de los suelos. Las principales formas de esta degradación son la pérdida de materia orgánica y la liberación de gases de efecto invernadero, la aplicación excesiva de fertilizantes, la erosión, la contaminación, la acidificación, la salinización y la pérdida de diversidad genética (Kopittke et al., 2019). De esta manera se produce una pérdida en la productividad y fertilidad del suelo, y como consecuencia los agricultores deben desplazarse a otro lugar para continuar con su actividad, lo que a su vez provoca una mayor degradación del suelo y los recursos forestales (Flores et al., 2019). La agricultura y la ganadería constituyen la principal causa directa de degradación de tierras en la amazonia de Madre de Dios (Alarcon et al., 2021). La mayoría de los agricultores dependen del bosque amazónico y que contribuyen a su degradación (Bandy, 2004). En este contexto, el uso de sistemas agroforestales (SAF) para la recuperación de tierras degradadas permite diversificar la producción de biomasa y puede aumentar la resiliencia ecológica, económica y social de las zonas afectadas por actividades antrópicas (Siqueira et al., 2020).

Los sistemas agroforestales integran cultivos agrícolas arbustos y especies arbóreas en la misma zona y tienen el potencial de mejorar las condiciones del suelo y la calidad del agua, así como de aumentar la biodiversidad y el secuestro de carbono (Siqueira et al., 2020). Debido a esto son reconocidos como una alternativa para contribuir al desarrollo sostenible por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica y la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación, la Conservación de los Bosques y el Aumento de las Reservas de Carbono (REDD+) (Nadège et al., 2019). Por lo tanto, la adopción de sistemas agroforestales se está promoviendo como una alternativa productiva sostenible para las comunidades locales, que puede compensar parcialmente los impactos negativos de los usos de la tierra de pastoreo extensivo a largo plazo y de la agricultura de bajos insumos (Cherubin et al., 2019).

El almacenamiento de carbono es un servicio medioambiental que promueve el uso de árboles en sistemas agroforestales y puede utilizarse para financiar iniciativas de inversión regionales y nacionales (IPCC, 2019). Por ello, diversos factores ambientales y vegetales influyen en la fotosíntesis y la respiración, como la radiación solar, la temperatura, la humedad, la presencia de agua y nutrientes, el ozono y otros contaminantes en el aire (Aristizabal & Guerra, 2002). De esta manera el cambio climático tiene un impacto en estos procesos, además las evidencias del cambio climático y el calentamiento global han inducido un creciente interés por cuantificar las reservas de carbono en la biomasa en la vegetación y el suelo (Zaro et al., 2020). Debido a esto los SAF vienen recibiendo especial interés, porque ofrecen más opciones para mitigar el cambio climático con la probabilidad de aumentar el rendimiento de los cultivos y de obtener otros productos medioambientales útiles (Adhikari et al., 2020).

En este sentido, el objetivo de la investigación es evaluar cuantitativamente el carbono almacenado (suelo, necromasa y vegetación) en cuatro sistemas agroforestales combinadas con cacao (*Theobroma cacao* L.) asociados con especies frutales y maderables, en parcelas ubicadas en cuatro distritos del departamento de Madre de Dios, Perú.

## 2. Materiales y métodos

**Ubicación de las parcelas.** Las parcelas agroforestales combinadas con cacao fueron evaluadas en cuatro distritos: San Francisco de Asís del distrito Las Piedras, Bajo Colorado del distrito de Madre de Dios, Tigremayoc del distrito de Huepetuhe y Monte Sinaí del distrito de Tambopata (Tabla 1). En los sistemas agroforestales el cultivo principal es el cacao y con diferentes combinaciones de especies maderables y frutales, con tiempo de establecimiento (edad) de 8 años, 10 años, 12 años y 15 años. La temperatura promedio en el área de estudio es de 28,5 °C y una

precipitación anual entre 3 000 mm y 6 000 mm. Esta zona tiene un paisaje de terraza media y terraza baja, de topografías planas a casi a nivel (GOREMAD & IIAP, 2009).

**Tabla 1.** Parcelas agroforestales

Sistema agroforestal	Edad	Distritos	Altitud	Coordenadas UTM Datum WGS 19S	
<i>Theobroma cacao</i> (cacao), <i>Bertholletia excelsa</i> (castaña) y <i>Theobroma grandiflorum</i> (copoazú)	8 años	Las Piedras	224 m	431071E	8596115N
<i>Theobroma cacao</i> (cacao), <i>Schizolobium parahyba</i> (pashaco) y <i>Dipteryx</i> sp. (shihuahuaco)	10 años	Huepetuhe	206 m	463352E	8593065N
<i>Theobroma cacao</i> (cacao), <i>Bertholletia excelsa</i> (castaña), <i>Jacaranda copaia</i> (achihua) y <i>Schizolobium parahyba</i> (pashaco)	12 años	Madre de Dios	270 m	347553E	8599735N
<i>Theobroma cacao</i> (cacao), <i>Bertholletia excelsa</i> (castaña) y <i>Bactris gasipaes</i> (pijuayo)	15 años	Tambopata	419 m	471741E	8595113N

**Metodología.** Se utilizó la metodología propuesta por Según Larrea (2007) y Arévalo & Alegre (2003), en cada uno de los sistemas de establecieron transectos donde se evaluaron y determinaron transectos al azar, tratando de abarcar una mayor extensión del área de estudio. El contenido de carbono de cada ecosistema se estimó utilizando diversas muestras de biomasa aérea, y de los diferentes componentes (suelo y necromasa).

Se utilizó la metodología desarrollada por el Consejo Internacional para la Investigación en Agroforestería - ICRAF (Arévalo & Alegre, 2003) para árboles con diámetro entre 2,5 cm y 30 cm de diámetro. Se delimitaron parcelas de 4 m x 25 m (0,02 ha). Se midió la altura (H) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles vivos, muertos en pie y caídos muertos. Se eligió al azar dos cuadrantes de 1 m x 1 m en cada una de las parcelas de 4 m x 25 m. En estas se cortó toda biomasa epigea procedente de arbustos menores a 2,5 cm de DAP y biomasa herbácea. Dentro de cuadrantes de 1 m x 1 m se tomaron sub-cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m para cuantificar la hojarasca acumulada. En estos cuadrantes de 0,5 x 0,5 también se colectó las muestras de suelo en bolsas herméticas y codificadas, posteriormente fueron secadas y tamizadas. Para cuantificar la densidad aparente se utilizó el método de cilindro de volumen propuesto por Peña (2008). Las muestras fueron enviadas al laboratorio de suelo y agua de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

La biomasa arbórea en pie se estimó utilizando la ecuación propuesta por Arévalo & Alegre (2003), Ecuación 1.

$$BA = 0,1184 \times DAP^{2,53} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

BA = Biomasa vegetal

DAP = Diámetro de la altura del pecho

Para estimar la biomasa de árboles caídos muertos se utilizó la siguiente ecuación (Ecuación 2).

$$BACM = 0,4 \times DAP^2 \times L \times 0,25\pi \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

DAP = Diámetro a la altura del pecho

L = Largo del tronco

$\pi = 3,1416$

0,4 y 0,25 = constantes

Para estimar la biomasa arbustiva-herbácea se utilizó la siguiente ecuación (Ecuación 3).

$$BAH = \frac{0,01 \times PSM \times PFT}{PFM} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde:

BAH = biomasa arbustiva/ herbácea, materia seca.  
 PSM = peso seco de la muestra colectada  
 PFM = peso fresco de la muestra colectada  
 PFT = Peso fresco de la muestra colectada  
 0,01 = factor de conversión para herbácea

**Carbono en Hojarasca (t/ha).** Se registró el peso fresco total por 0,25 m<sup>2</sup>; de ésta se sacó una muestra y se registró su peso; se colocó en bolsas de papel debidamente codificadas y se secaron en estufas a 75 °C hasta obtener el peso seco constante (Arévalo & Alegre, 2003). El peso seco obtenido se llevó a toneladas por hectárea y multiplicó por el factor 0,45 para obtener la cantidad de carbono por hectárea (C/ha) en la hojarasca. Se asume que el 45% del peso seco constante de la biomasa vegetal es carbono.

**Cálculo del contenido de carbono en la biomasa vegetal.** Para calcular el contenido de carbono en la biomasa vegetal se utilizó la siguiente ecuación (Ecuación 4).

$$CC = 0,45 \times B \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Donde:

CC = contenido de carbono en la biomasa vegetal  
 B = Biomasa vegetal

**Carbono orgánico en el suelo.** Se utilizó la siguiente ecuación Larrea (2007), Ecuación 5.

$$CS = CC \times DA \times P \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Dónde:

CS = Carbono en el suelo (tC/ha)  
 CC = Contenido de carbono (%)  
 DA = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)  
 P = Profundidad de muestreo (0-30 cm)

**Análisis estadístico.** El análisis estadístico se realizó con los programas SPSS v.26 y SigmaPlot 14.5. Mediante análisis descriptivos se calculó la biomasa y el carbono de los sistemas agroforestales evaluados según componentes (aérea, necromasa, suelo) y según tiempo de establecimiento (edad). Los análisis se representaron mediante Tablas y gráficos de cajas generados en el SigmaPlot. Para modelar los cambios en el contenido de carbono en los sistemas agroforestales según tiempo de establecimiento (8 años, 10 años, 12 años y 15 años), se realizó un análisis de regresión simple, y comparando un modelo lineal con el modelo sigmoidal de Gompertz. Para caracterizar y comparar la biomasa y contenido de carbono según componente (aérea, necromasa y suelo) se realizaron gráficos de boxplot.

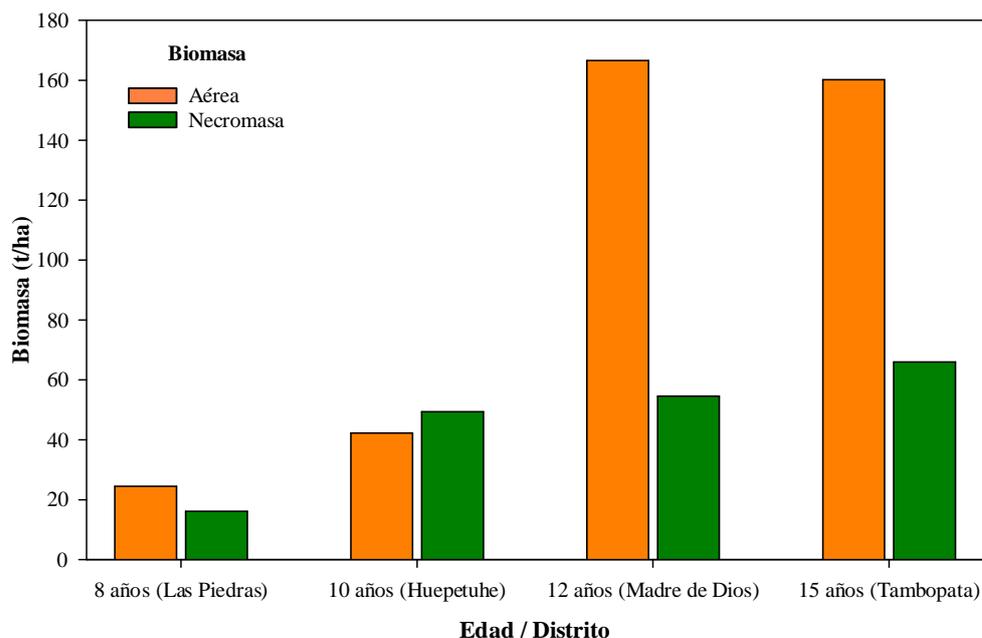
### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Biomasa en los componentes aéreos y necromasa

**Biomasa en las parcelas.** El sistema que acumuló mayor biomasa aérea fue la parcela con cacao de 12 años (166,60 t/ha) asociado con especies forestales como castaña, achihua y pashaco, el cacao con un distanciamiento de 5 m × 5 m y las demás especies tuvieron un distanciamiento de 10 m × 10 m. Por lo tanto, este sistema agroforestal se puede considerar excelente, debido a la

importante cantidad de biomasa aportada por los árboles y el aporte de la abundante hojarasca (Larrea, 2007).

Se encontró que la biomasa en las parcelas de cacao se incrementa con el tiempo hasta cierta edad (Figura 1). Sin embargo, el incremento de la biomasa de hojarasca fue progresiva desde la parcela de 10 años, esto se debe a que estas parcelas poseen un pH entre 4,0–4,7. Herrera & Alvarado (1998) sugieren que en parcelas agroforestales de cacao, la calidad y el potencial productivo de un lugar están influidos por la calidad del terreno y los parámetros del suelo, que pueden utilizarse para estimar la productividad, la cantidad de biomasa y otros aspectos del crecimiento de un cultivo específico, ya sea agrícola o forestal.



**Figura 1.** Biomasa del componente aéreo y necromasa de las diferentes parcelas de estudio.

Por otro lado, Alegre et al. (2002) y Lapeyre et al. (2004) encontraron que la acumulación de biomasa en los sistemas agroforestales está directamente relacionada con el tiempo de establecimiento del sistema agroforestal. Esto se corrobora con los resultados encontrados en el presente estudio, ya que el contenido de carbono y biomasa encontrado en los sistemas agroforestales de 12 y 15 años fueron superiores a los de 8 y 10 años de establecimiento, entre 46%-79% más carbono almacenado (Tabla 2).

El sistema que acumuló más necromasa fue la parcela con cacao de 15 años (66 t/ha) asociado con Achihoa y Castaña, el cacao poseía un distanciamiento de 4 m x 6 m y las demás especies tuvieron un distanciamiento de 18 m y 20 m.

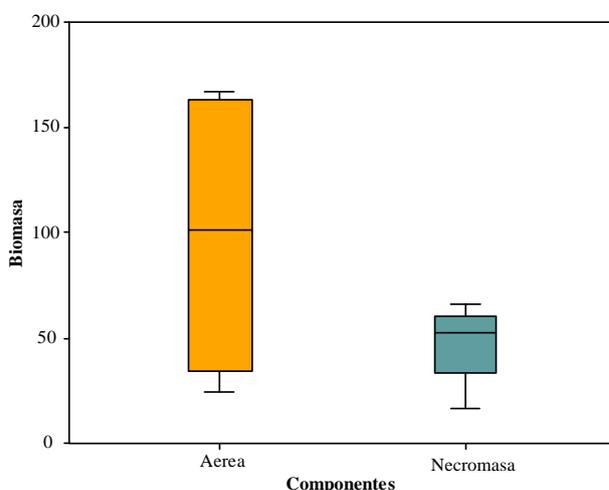
En la parcela agroforestal de 8 años los componentes se caracterizaron por tener una biomasa media de 20,35 t/ha en estimación mínima. En la parcela agroforestal de 10 años los componentes se caracterizan por tener una biomasa media de 45,85 t/ha. En la parcela agroforestal de 12 años los componentes se caracterizaron por tener una biomasa media de 110,60 t/ha. La parcela agroforestal de 15 años los componentes se caracterizaron por tener una biomasa media de 113,1 t/ha.

En la parcela del distrito Las Piedras con edad de 8 años se reportó una acumulación con mínima de 16,20 t/ha y acumulación máxima de 24,50 t/ha. Para el caso de la parcela del distrito de Madre de Dios con 12 años de edad una acumulación mínima de mínima de 54,60 t/ha y acumulación máxima de 166,60 t/ha (Tabla 2).

**Tabla 2.** Resultados de carbono en biomasa, necromasa y suelo

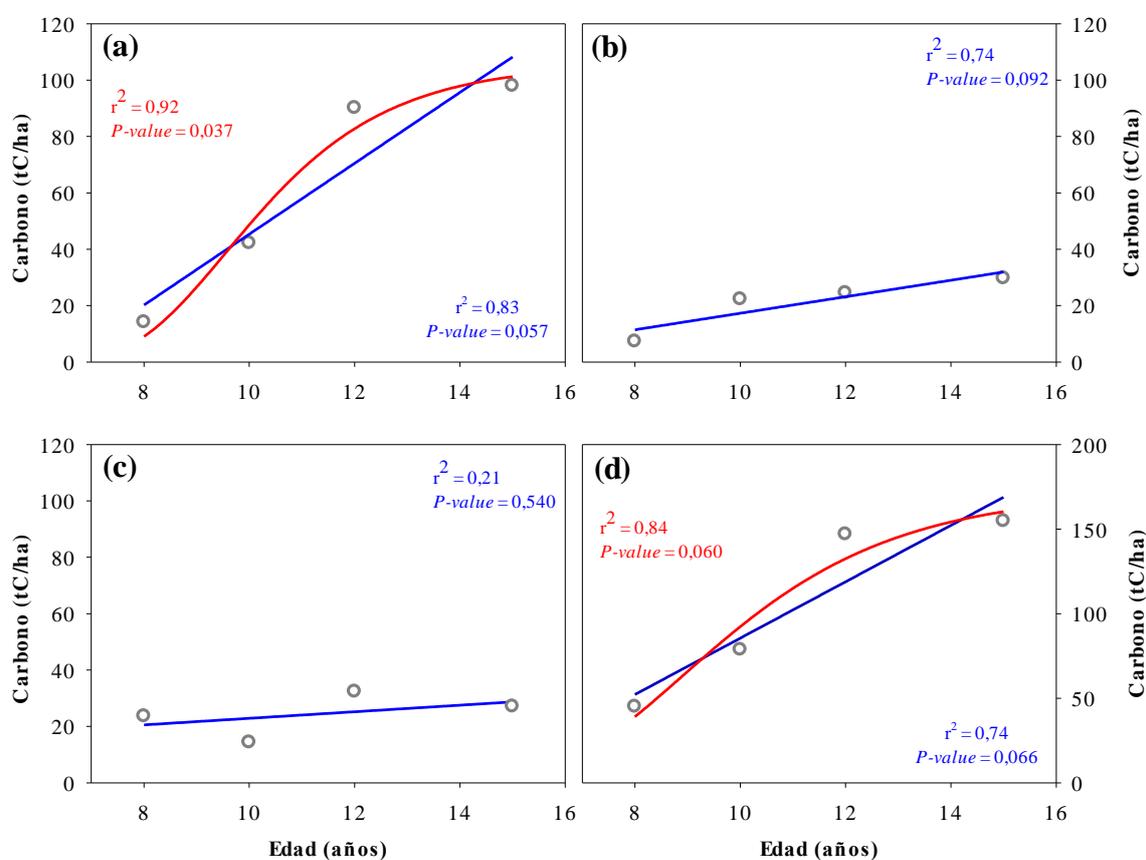
Biomasa aérea	Cod	Estándar (t/ha)	Larrea (t/ha)
08 A-Las Piedras	08 A	31,32	24,48
10 B-Huepetuhe	10 B	93,65	42,34
12 A-Madre de Dios	12 A	200,16	166,56
15 A-Tambopata	15 A	217,63	160,18
Biomasa Necromasa	Cod	P. Fresco (gr)	P Seco (gr)
08 A-Las Piedras	08 A	90	40,50
10 B-Huepetuhe	10 B	190	123,50
12 A-Madre de Dios	12 A	210	136,50
15 A-Tambopata	15 A	250	165
Suelo Promedio	Cod	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	%C
08 A-Las Piedras	08 A	1,27	1,47
10 B-Huepetuhe	10 B	1,05	1,28
12 A-Madre de Dios	12 A	1,39	1,70
15 A-Tambopata	15 A	1,17	1,98
Carbono aéreo	Cod	F (0,45) Estándar	F (0,45) Larrea
08 A-Las Piedras	08 A	14,09	11,02
10 B-Huepetuhe	10 B	42,14	19,05
12 A-Madre de Dios	12 A	90,07	74,95
15 A-Tambopata	15 A	97,93	72,08
Carbono Necromasa	Cod	F (0,45)	CC en t/ha
08 A-Las Piedras	08 A	18,23	7,29
10 B-Huepetuhe	10 B	55,58	22,23
12 A-Madre de Dios	12 A	61,43	24,57
15 A-Tambopata	15 A	74,25	29,70
Carbono suelo	Cod	% C	CC t/ha
08 A-Las Piedras	08 A	1,47	23,58
10 B-Huepetuhe	10 B	1,28	14,33
12 A-Madre de Dios	12 A	1,70	32,31
15 A-Tambopata	15 A	1,98	27,06

**Biomasa en componentes.** Los componentes de biomasa aérea se caracterizaron por tener una acumulación media de biomasa con 98,40 t/ha en estimación mínima para el 95% de confianza del total del componente aéreo y fluctúa entre 21,60 t/ha y 218,40 t/ha. En los componentes de la necromasa se caracterizaron por tener una acumulación media 46,55 t/ha en el 95% de confianza del total del componente aéreo y fluctúa entre 12,50 t/ha y 80,50 t/ha (Figura 2).

**Figura 2.** Flujo de biomasa en los componentes

### 3.2. Carbono en parcelas y componentes

Considerando el carbono almacenado en los tres componentes del sistema agroforestal (aéreo, suelo y necromasa), el sistema agroforestal de 15 años fue el que acumuló más carbono fue la parcela con cacao de 15 años, 154,7 tC/ha en total, de las cuales el carbono aéreo es el de mayor aporte con 90,1 tC/ha. Esta diferencia con los demás sistemas agroforestales se debería a la presencia de especies forestales, como castaña, achihua y pashaco, y a un menor distanciamiento de plantación (5 m × 5 m), mientras que las especies tuvieron un mayor distanciamiento (10 m × 10 m) (Figura 3). Por otro lado, se encontró una relación directa entre la edad y el carbono aéreo, suelo y en necromasa (Figura 3), es decir a mayor tiempo de establecimiento del sistema agroforestal mayor será su almacenamiento de carbono. Sin embargo, para el carbono aéreo y total el almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales tiende a estabilizarse a partir de los 12 años. Esto se sustenta en que el modelo sigmoïdal de Gompertz fue de mejor ajuste para la relación entre la edad del sistema agroforestal y el carbono aéreo y total (Figura 3).



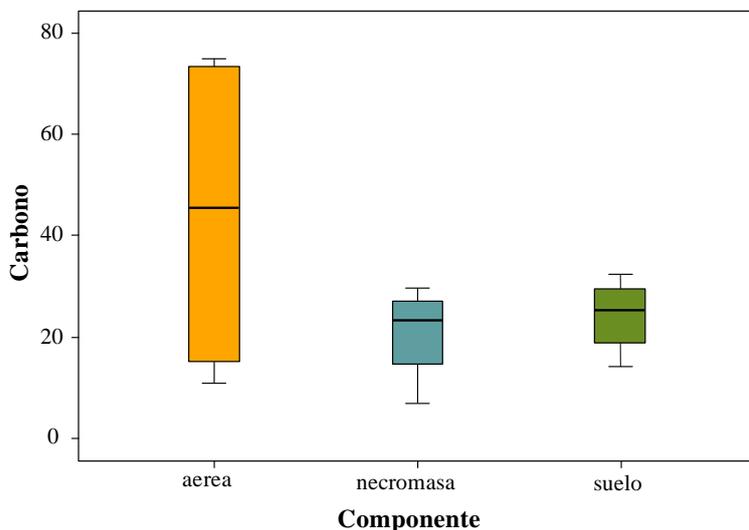
**Figura 3.** Dispersión de carbono en función a la edad. (a) aérea, (b) necromasa, (c) suelo y (d) total.

Se registró la cantidad de carbono almacenado por la vegetación en los sistemas con cacao de distintas edades, siendo los sistemas agroforestales de 12 y 15 años los que alcanzaron los niveles más altos de carbono, entre 90,1 a 97,9 tC/ha. Estos valores son superiores al reportado por Bringas-Paredes (2010) en sistemas agroforestales con cacao y laurel con edades entre 9 a 11 años, quien encontró un almacenamiento de carbono en estos sistemas entre 74,80 tC/ha y 69,50 tC/ha. Bringas-Paredes (2010) atribuyó estos altos niveles de almacenamiento de carbono a la presencia de laurel, una especie con buenas características para la acumulación de materia orgánica y fijación de carbono. Además, Ortiz & Riascos (2006) mencionan que, en un sistema agroforestal asociado con laurel, esta especie almacena entre 80%-85% del carbono total del sistema.

Sin embargo, De La Cruz (2010) en sistemas agroforestales en la región San Martín (Tocache) encontraron contenido de carbono superiores al reportando en el presente estudio. El valor más alto de contenido de carbono fue en un sistema agroforestal de años (168,50 tC/ha) y el menor uno de 6 años de establecimiento (95,80 tC/ha), esto se debería a que la cantidad de carbono almacenada en los árboles aumenta a medida que pasa el tiempo (De La Cruz, 2010). Similar patrón se observó en el presente estudio, con mayor contenido de carbono en las parcelas con mayor tiempo de establecimiento (Tabla 2).

Por otro lado, se observó un mínimo aporte del carbono en hojarasca de 8 años, 10 años, 12 años y 15 años; con 7,29 t/ha; 22,23 t/ha; 24,57 t/ha y 29,70 t/ha respectivamente (Tabla 2). Estos son inferiores a los encontrados por Salazar (2012), que encontró un promedio de entre 0,05 a 6,56 tC/ha. Esta diferencia se debería a las diferentes actividades de mantenimiento que se realizan en las plantaciones (limpieza, raleo, etc.), en la cual los agricultores optaron por retirar las hojas podadas de la plantación, mientras que en el presente estudio se excluyó parcelas con actividades silviculturales.

Carbono almacenado en los diferentes componentes, la dispersión de carbono se reporta con una acumulación media de 44,27 tC/ha en estimación mínima para el componente aéreo, 20,94 tC/ha en estimación mínima para el componente de necromasa, 24,32 tC/ha en estimación mínima para el componente suelo (Figura 4).



**Figura 4.** Flujo de carbono en los diferentes componentes

Aristizabal & Guerra (2002) encontraron un almacenamiento de carbono, en promedio de 64,54 tC/ha en sistemas agroforestales de cacao-laurel de 15 años de establecimiento. Herrera (2010) estudió cacaotales con almacenamiento de 90,49 tC/ha en biomasa arriba del suelo con parcelas de 15 años de establecimiento. Los resultados encontrados en el carbono aéreo almacenado en el presente estudio son inferiores a los encontrados por Herrera (2010) (Tabla 2).

En relación a reservas de carbono encontradas en la biomasa aérea, necromasa y suelo de diferentes sistemas agroforestales se cuenta con el estudio Larrea (2007) que reportó parcelas de cacao con 8 años de edad alcanzo a un promedio de 73,79 tC/ha dicha parcela asociada con capirona, bolaina y caoba. Además, Lapeyre et al. (2004) en sistemas agroforestales de 15 años en promedio acumulaba una reserva de 47 tC/ha en especies de sombra, una cifra bastante cercana a la media de lo encontrado en el presente estudio.

## 4. Conclusiones

Las diferentes edades del sistema agroforestal combinado con cacao presentan distintos niveles de almacenamiento de biomasa total, y por lo tanto diferentes niveles de fijación de carbono. Por lo tanto, se concluye que la biomasa y el almacenamiento de carbono posee una tendencia no lineal, sigmoideal de Gompertz, es decir, las reservas de carbono se estabilizan a partir de los 12 a 15 años de edad. Además, conciben una relación directa, es decir, se acumulan biomasa según la edad y longevidad de la especie. Finalmente, la cantidad de carbono en el suelo se define por las características fisicoquímicas del suelo y no las especies y/o edad del sistema agroforestal.

## Financiamiento

Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no incurren en conflicto de intereses.

## Contribución de autores

S-H, O: conceptualización, análisis formal, investigación, escritura (preparación del borrador final).

G-Q, J. S.: metodología, investigación, curación de datos, redacción (revisión y edición).

## Referencias bibliográficas

- Adhikari, B., Lodhiyal, N., & Lodhiyal, L. (2020). Assessment of crop yield, productivity and carbon sequestration in agroforestry systems in Central Himalaya, India. *Agroforestry Systems*, 94(1), 281-296. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00388-2>
- Alarcon, G., Canahuire, R., Guevara, F., Rodríguez, L., Gallegos, L., & Garate-Quispe, J. (2021). Dynamics of forest loss in the southeast of the Peruvian Amazon: a case study in Madre de Dios. *Ecosistemas*, 30(2), 1-11. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>
- Alegre, J., Arevalo, L., & Ricse, A. (2002). *Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonia peruana*. Consejo Internacional para la Investigación en Agroforestería ICRAF/ Instituto Nacional para la Innovación Amazónica INIA. Perú.
- Arévalo, C., & Alegre, J. (2003). *Manual de Determinación de Carbono en los Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en el Perú*. ICRAF, CODESU, INIA e INRENA.
- Aristizabal, J., & Guerra, A. (2002). *Estimación de la tasa de fijación de Carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero Cordia alliodora - cacao Theobroma cacao L., -plátano Musa paradisiaca* [Tesis de grado]. Universidad Distrital.
- Bandy, D. (2004). *Estudio de Suelos en la Zonas del Programa de Desarrollo Alternativo*. CARE/PDA.
- Bringas-Paredes, H. (2010). *Estimación del carbono almacenado en un Sistema Agroforestal de Cacao (Theobroma cacao L.) comparado con un bosque secundario de tres edades* [Tesis de grado]. Repositorio insitucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/119>
- Cherubin, M., Chavarro-Bermeo, J., & Silva-Olaya, A. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1741-1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>
- Decuyper, M., Chávez, R., Lohbeck, M., Lastra, J., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M., & Vågen, T.-G. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time

- series. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>
- De La Cruz, M. (2010). *Estimación del carbono almacenado en plantaciones de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq) de diferentes edades en Pumawasi- Uchiza* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Flores, B., Staal, A., Jakovac, C., Hirota, M., Holmgren, M., & Oliveira, R. (2019). Soil erosion as a resilience drain in disturbed tropical forests. *Plant and Soil*, 11-25.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04097-8>
- Gobierno Regional de Madre de Dios [GOREMAD], & Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana [IIAD]. (2009). *Macro Zonificación Ecológica Económica como base para el Ordenamiento Territorial*. Madre de Dios.
- Herrera, J. (2010). *Estimación de la biomasa y carbono almacenado en dos sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao L.) de diferentes edades en la Provincia de Leoncio Prado* [Tesis de grado]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.  
<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/123>
- Herrera, B., & Alvarado, A. (1998). *Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro America*. Agronomía Costarricense.
- Kopittke, P., Menzies, N., Wang, P., McKenna, B., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1,2), 35-44. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v3n1-2/a06v3n1-2.pdf>
- Larrea, G. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de combinaciones agroforestales de Theobroma cacao L. & determinación de la ecuación alométrica para el cacao* [Tesis de grado]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1152>
- Ortiz, A., & Riascos, L. (2006). *Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao Theobroma cacao L y laurel Cordia alliodora (Ruiz y Pavón) Oken en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica* [Trabajo de grado]. Repositorio institucional de la Universidad de Nariño. <http://hdl.handle.net/11554/245>
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC]. (2019). Cropland – Chapter 5. In Volume 4 – *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; IPCC: Geneva, Switzerland.
- Peña, J. (2008). *Guía metodológica para estudios y análisis de suelos tropicales*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios-MDD, Suelos Forestales, CAP III.
- Salazar, E. (2012). *Cuantificación del carbono en la biomasa aérea de tres diferentes usos de la tierra en la cuenca de Aguaytía sectores: Irazola, curimaná y campo verde - Región Ucayali* [Tesis de grado]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.  
<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/541>
- Siqueira, C., Chiba, M., Moreira, R., & Abdo, M. (2020). Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1059-1069.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-019-00470-9>
- Zaro, G., Caramori, P., Yada, G., Sanquetta, C., Filho, A., Nunes, A., Prete, C., & Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, 94(3), 799-809.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>