

Contribución de los fragmentos de vegetación al almacenamiento de carbono en paisajes agrícolas de la Amazonía peruana

Contribution of vegetation fragments to carbon storage in agricultural landscapes of the Peruvian Amazon

Jorge Washinton Vela Alvarado *¹

<https://orcid.org/0000-0002-3420-3952>
jvelaunu@gmail.com

Zoyla-Mirella Clavo²

<https://orcid.org/0000-0001-9845-7997>
zclavop@unmsm.edu.pe

Noé Ramírez-Flores³

<https://orcid.org/0000-0002-6683-728X>
nramirez@iiap.gob.pe

Pedro Pablo Villegas Panduro⁴

<https://orcid.org/0000-0001-9300-8113>
pablo_villegas@unu.edu.pe

Carlos Saito Villanueva⁵

<https://orcid.org/0000-0002-3884-7149>
csaito@pucp.pe

*Corresponding author

1. Universidad Nacional de Ucayali – UNU, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Centro de Investigación de Fronteras Amazónicas, CIFA, Grupo de Investigación SISBA. Pucallpa, región Ucayali.

2. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Medicina Veterinaria, Instituto Veterinario de Investigaciones Tropicales y de Altura, Estación IVITA Pucallpa.

3. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Av. Abelardo Quiñones Km 2.5. San Juan, Loreto, Perú.

4. Universidad Nacional de Ucayali – UNU, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Pucallpa, región Ucayali.

5. Grupo de Investigación de Sistemas Aéreos No Tripulados, Sección de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Citación

Vela Alvarado JW, Clavo Z-M, Ramírez-Flores N, Villegas Panduro PP, Saito Villanueva C. 2024. Contribución de los fragmentos de vegetación al almacenamiento de Carbono en paisajes agrícolas de la Amazonía peruana. Revista peruana de biología 31(2): e27004 001- 014 (Junio 2024). doi: <https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v31i2.27004>

Presentado: 13/12/2023

Aceptado: 20/05/2024

Publicado online: 30/06/2024

Editor: Leonardo Romero

Resumen

En el presente estudio se cuantifican las reservas de carbono existentes en siete fragmentos del paisaje agropecuario: (1) el bosque primario altamente talado, (2) bosques secundarios de 5, (3) 10 y (4) 15 años procedentes de pasturas, (5) agroforestería de cacao, (6) pastizal de *Brachiaria decumbens* en producción y (7) pastizal de *Brachiaria decumbens* degradado; estos fragmentos son característicos de los fundos agropecuarios del departamento de Ucayali, Perú. El carbono almacenado (la suma total de la parte aérea y del suelo) en el Bosque Primario fue de 267.26 t/ha; en Bosque Secundario de 15 años 232.30 t/ha; en Bosque Secundario de 10 años, 162.1 t/ha; en Bosque Secundario de 5 años, 124.42 t/ha; en agroforestería con cacao, 108.82 t/ha; en pastizal de *B. decumbens*, 72.57 t/ha; y en pastizal de *B. decumbens* degradada, 60.47 t/ha. Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.0001$) entre los valores de carbono almacenado de los siete fragmentos, ($R^2 = 0.51$, y $CV = 53.66\%$). La prueba de contrastes ortogonales mostró que el carbono almacenado en el fragmento de bosque primario superó significativamente al promedio de carbono de los demás fragmentos; mientras que, el carbono almacenado en los bosques secundarios superó significativamente al carbono almacenado en el fragmento de agroforestería de cacao. No se encontraron diferencias del carbono almacenado en ambas pasturas, tampoco entre los bosques secundarios de 10 y 15 años. El incremento del número de familias y especies en relación directa a la edad del bosque secundario sería evidencia de la recuperación de la diversidad botánica.

Abstract

In the present study, carbon stocks were quantified in seven agroforestry landscape fragments: (1) heavily logged primary forest, (2) secondary forests of 5, (3) 10, and (4) 15 years originating from pastures, (5) cacao agroforestry, (6) productive *Brachiaria decumbens* grassland, and (7) degraded *Brachiaria decumbens* grassland. These fragments are characteristic of agricultural estates in the Ucayali department, Peru. The carbon stored (the total sum of aboveground and soil) in the primary forest was 267.26 t/ha; in 15-year secondary forest, 232.30 t/ha; in 10-year secondary forest, 162.1 t/ha; in 5-year secondary forest, 124.42 t/ha; in cacao agroforestry, 108.82 t/ha; in productive *B. decumbens* grassland, 72.57 t/ha; and in degraded *B. decumbens* grassland, 60.47 t/ha. Significant differences ($p \leq 0.0001$) were observed between the carbon stock values of the seven fragments ($R^2 = 0.51$, and $CV = 53.66\%$). Orthogonal contrast tests showed that the carbon stored in the primary forest fragment significantly exceeded the average carbon of the other fragments, while the carbon stored in the secondary forests significantly exceeded that stored in the cacao agroforestry fragment. No differences were found in the carbon stored in both grasslands, nor between the 10- and 15-year secondary forests. The increase in the number of families and species directly related to the age of the secondary forest provides evidence of the recovery of botanical diversity.

Palabras claves:

Cambio climático, Conservación de la biodiversidad, Bosques secundarios, Servicios ambientales, Ganadería sostenible.

Keywords:

Climate change, Biodiversity conservation, Secondary forests, Environmental services, Sustainable livestock farming.

Introducción

Los impactos antropogénicos sobre el medio ambiente, incluida la deforestación y las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero, han contribuido significativamente al cambio climático global que puede provocar alteraciones en los ecosistemas. En este sentido los bosques tropicales son pilares para la conservación de la biodiversidad al mantener la viabilidad de poblaciones vegetales de diversas especies incluido las especies en peligro de extinción (De Moraes et al. 2024).

El contenido de carbono vegetal en los bosques tropicales es de vital importancia para mantener el equilibrio ecológico (Blais et al. 2005). El ecosistema forestal tiene una alta densidad de carbono y a su vez un considerable potencial como sumidero de carbono (Halliday et al. 2003, Perruchoud et al. 1999), estimándose que contienen aproximadamente el 80% del carbono terrestre (Batjes 1996, Jobbágy & Jackson 2000). Se ha determinado que la cantidad de carbono intercambiada entre el bosque y la atmósfera, en forma de CO₂ a través de la fotosíntesis y la respiración, es siete veces mayor que la emisión antropogénica de carbono. Al respecto, la materia orgánica en la superficie del suelo está directamente relacionada con el aporte directo de carbono. Es así que, los bosques además de representar recursos importantes, también almacenan considerables cantidades de carbono en el suelo que duplicaría y triplicaría la cantidad de carbono de la biomasa aérea del bosque y la disponible en la atmósfera respectivamente (Pavan et al. 2013).

Entre el 2001 y el 2020, la deforestación y fragmentación de los bosques de la Amazonía peruana se ha estimado en 2'636,585 hectáreas de bosque primario, y en el 2022 se reportó la pérdida de 144,682 hectáreas de bosque primario, lo que representa un incremento del 6.7% respecto al año 2021, concentrándose esta deforestación en los departamentos de Ucayali y Madre de Dios (Finer & Mamani 2023). Más del 80% de la deforestación se atribuye a la agricultura en pequeña escala y a la ganadería en parcelas de entre 1 y 5 hectáreas, propiciando el incremento de la fragmentación del bosque. (FAO 2017, Finer & Mamani 2023, Lapola et al. 2023). Un análisis por sectores establece una gradiente de 87 millones de toneladas de gases de efecto invernadero (GEI) emitidas por el cambio de uso y tipos de suelos, de las cuales 26 millones de toneladas son emitidas en la actividad agrícola y pecuaria (Finer & Mamani 2021)

Actualmente, el departamento de Ucayali es el de mayor deforestación en la Amazonía peruana, registrándose que de un total de 9'709,650 ha de bosques existentes en el año 2001, se han perdido 384,474 ha hasta el año 2018, siendo las provincias de Padre Abad y Coronel Portillo las que presentan mayor deforestación. Estas pérdidas se suman a los procesos de degradación de los ecosistemas, la contaminación ambiental y la liberación de GEI de origen antropogénico (MINAM 2016). Este hecho condujo al gobierno regional de Ucayali a ser el primero en incorporar en su "Estrategia Regional de Cambio Climático" como Contribuciones Nacionalmente Deter-

minadas (Guadalupe et al. 2020) a los sistemas silvopastoriles como una actividad de mitigación y adaptación al cambio climático.

El desarrollo de la ganadería con tecnologías amigables con el ambiente, como los sistemas silvopastoriles son una opción sustentable, ya que ayudan a prevenir la deforestación, aumentar la presencia de árboles en los fundos, incrementar la productividad, la resiliencia y la mitigación del cambio climático (Murguitio et al. 2003). Rüginitz et al. (2009), Rüginitz (2011a) y Cuellar y Salazar (2016) encontraron que luego del desarrollo de una actividad agrícola o ganadera los pastos y los bosques secundarios de diferentes edades y orígenes tienen el potencial de absorber dióxido de carbono y almacenarlo en forma de biomasa, por lo que es importante conocer la cantidad de carbono almacenado en los diferentes fragmentos del paisaje agropecuario, lo que permitirá gestionar y conservar estos remanentes de bosque, además de generar un importante ingreso para los ganaderos por la venta de bonos de carbono (Rüginitz 2011b).

Numerosos estudios han calculado el contenido de carbono en el bosque primario, en los remanentes de bosque, en bosques secundario en recuperación, así como en áreas de bosque con uso de cultivos y pastos. Por ejemplo, en bosques secundarios después de cultivos agrícolas de 4 y 7 años, Susanto et al. (2023) encontraron 550 kg/ha y 140 kg/ha de carbono, respectivamente. Por otro lado, Ramachandran et al. (2009) señalan que una estrategia de secuestro de carbono en el suelo sería a través de la agroforestería, encontrando entre 100 – 250 kg/ha de carbono en trópicos húmedos. En el Perú, Surco-Huacachi y Garate-Quispe (2022) cuantificaron el carbono en el suelo, hojarasca y vegetación en sistemas agroforestales con cacao en Madre de Dios-Perú, el sistema con mayor acumulación de carbono aéreo fue la parcela con cacao de 12 años con 131.83 t/ha. Rüginitz (2011a) en Pucallpa-Perú calculó el contenido de carbono en el bosque primario (327.57 t/ha), bosque secundario menor de 5 años (108.9 t/ha), Bosque secundario mayor de 5 años (117.5 t/ha), pastura degradada sin arboles (37.9 t/ha), agroforestería con cacao (115.3 t/ha) Por su parte Cuellar y Salazar (2016), en la cuenca del Aguaytía, Ucayali, calcularon el almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de uso del suelo, encontrando en el bosque primario (232.3 t /ha), en una purma alta (150.1 t/ha), purma baja (91.9 t/ha), y en pasturas (96.4 t/ha).

El presente estudio tiene como objetivo cuantificar las reservas de carbono existentes en siete fragmentos del paisaje agropecuario, característicos de los fundos agropecuarios del departamento Ucayali-Perú como son: el bosque primario altamente talado, bosques secundarios (de 5, 10 y 15 años procedentes de pasturas), agroforestería de cacao, pastizal de *Brachiaria decumbens* en producción y pastizal de *Brachiaria decumbens* degradado (con más de 70% de vegetación invasora y sin árboles). Además, este conocimiento en tiempo real de las cantidades de carbono en los fragmentos agropecuarios permitirá a los productores ganaderos desarrollar

producción agropecuaria con modelos amigables con el medio ambiente como una forma de contribuir a la mitigación y adaptación al cambio climático, contribuyendo con la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios; y a los políticos y estado, desarrollar una buena gestión pública en la actividad ganadera en sintonía con el cambio climático y la conservación de la biodiversidad.

Material y métodos

Lugar y fecha de ejecución. La investigación se realizó desde febrero del 2020 hasta agosto del 2023, en siete fundos ubicados en las márgenes de la carretera Pucallpa-Tingo María entre el kilómetro 75 (UTM 0498607 LS, y 9031919 LW) y el kilómetro 86 (UTM 0499121 LS, y 9023042 LW) (ver Tabla 1), en los distritos de Monte Alegre y Von Humboldt, provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali-Perú (Figura 1). El área total evaluada fue de 9600 ha del ecosistema de Bosque Húmedo Tropical Semisiempreverde Estacional (Tuomisto

1993), la cual presenta una precipitación promedio de 3600 mm anuales, temperatura media anual de 26°C, se ubica ente los 250 y 300 m de altitud, el suelo es superficial, de textura franco-arcillosa, ácido, bajo en contenido de materia orgánica, fósforo, cationes intercambiables y alta saturación de aluminio (Tablas 3 y 4).

Fragmentos del paisaje agropecuario.

En los fundos identificados se realizó un recorrido y se levantó un mapa, identificando los fragmentos agropecuarios existentes. Para conocer el manejo previo de los fragmentos, el tiempo de uso en una determinada actividad productiva, la sucesión de los bosques secundarios (edad). Para esto, a los pobladores se aplicó una encuesta semiestructurada que detallaba: años de residencia en el fundo, años de derribo del bosque, años de pastoreo con *Brachiaria*, tipo de manejo, la razón de la degradación de la pastura, años de sucesión del bosque

Tabla 1. Ubicación de los fundos donde se midió el carbono en siete fragmentos del paisaje agropecuario. Departamento de Ucayali, Perú

N°	Propietario/ Nombre del Fundo	Lugar	Paisaje agropecuario	Ubicación geográfica (UTM)		Altitud (m)	Distancia de la vivienda al paisaje
				S	W		
1	Félix Inga/ fundo Yongote	Carretera Pucallpa - Lima km 75	Sistema agroforestal cacao: <i>Theobroma cacao</i>	0498607	9031919	176	100 m
2	Presentación Cabrera/ fundo Paris	Carretera Pucallpa - Lima km 76	Bosque primario	0498477	9030950	194	1.61 km
			Bosque secundario 15 años de sucesión (edad)	0498477	9030950	194	665 m
			Pastizal degradado de <i>Brachiaria decumbens</i>	0498477	9030950	194	89 m
			Pastizal en buen estado <i>Brachiaria decumbens</i>	0498477	9030950	194	427 m
3	José Cabrera/ fundo Ange- lito	Carretera Pucallpa - Lima km 77.5	Bosque primario	0498637	9030565	166	2.55 km
			Bosque secundario 10 años de sucesión (edad)	0498637	9030565	166	2.00 km
4	Margarita Advíncula/ fundo Los Manguales	Carretera Pucallpa - Lima km 80	Bosque primario	0497255	9028671	175	1.23 km
			Bosque secundario 10 años de sucesión (edad)	0497255	9028671	175	828 m
			Bosque secundario 5 años de sucesión (edad)	0497255	9028671	175	600 m
			Sistema Agroforestal cacao: <i>Theobroma cacao</i>	0497255	9028671	175	120 m
			Pastizal degradado de <i>Brachiaria decumbens</i>	0497255	9028671	175	152 m
5	Guadalberto Quispe/ fundo Quispe	Carretera Pucallpa - Lima km 81	Bosque secundario 15 años de sucesión (edad)	0496989	9028357	159	849 m
			Bosque secundario 10 años de sucesión (edad)	0496989	9028357	159	484 m
			Bosque secundario 5 años de Sucesión (edad)	0496989	9028357	159	1.14 km
6	Santos Cueva/ fundo Santos Cueva	Carretera Pucallpa - Lima km 83	Bosque secundario 15 años de sucesión (edad)	0496576	9026945	162	1.38 km
			Pastizal mejorado de <i>Brachiaria decumbens</i>	0496576	9026945	162	2.71 km
			Pastizal degradado de <i>Brachiaria decumbens</i>	0496576	9026945	162	1.07 km
7	Ernesto Mo- rón/ fundo Morón	Carretera Pucallpa - Lima km 86 Int. 5 km - Caserío Yanayacu	Bosque secundario 5 años de sucesión (edad)	0499121	9023042	190	466 m
			Sistema agroforestal cacao: <i>Theobroma cacao</i>	0499121	9023042	190	99 m
			Pastizal mejorado de <i>Brachiaria decumbens</i>	0499121	9023042	190	364 m

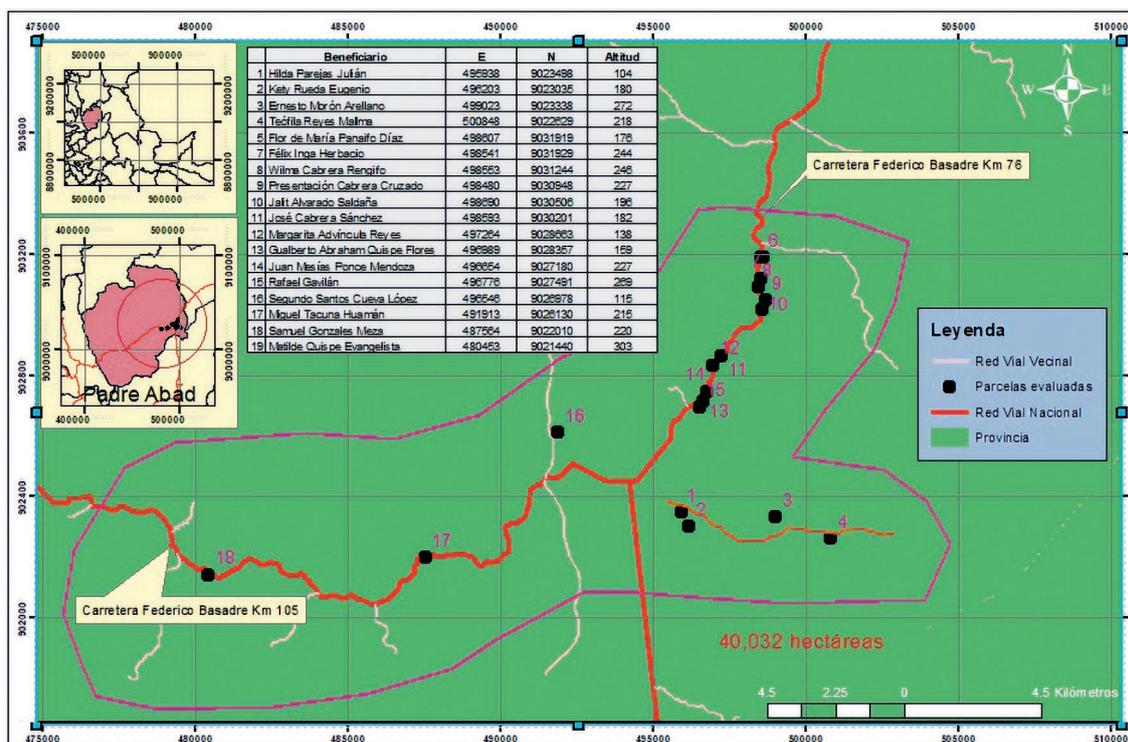


Figura 1: Ubicación geográfica de los fundos agropecuarios donde se midió el carbono almacenado en los fragmentos identificados. Distritos de Monte Alegre y Alexander Von Humboldt, provincia Padre Abad, departamento de Ucayali.

secundario y fechas importantes que confirma la edad del bosque secundario; bajo estas consideraciones se identificaron siete fragmentos agropecuarios (Figura 2):

- Bosque primario altamente talado.
- Bosque secundario de 5 años procedente de pasturas.
- Bosque secundario de 10 años procedente de pasturas.
- Bosque secundario de 15 años procedente de pasturas.
- Agroforestería con cacao y árboles maderables.
- Pastizal de *B. decumbens* en producción.
- Pastizal de *B. decumbens* degradado (con más de 70% de vegetación invasora y sin árboles).

Debido a que no se encontraron todos los fragmentos en un solo fundo, y considerando tres repeticiones por fragmento se utilizaron siete fundos agropecuarios para las mediciones respectivas (Tabla 1).

Toma de muestras

Luego de la identificación de los fragmentos agropecuarios se procedió a la georreferenciación y la medición del área de cada uno de ellos y la demarcación de las parcelas de muestreo en cada fragmento. La toma de muestras de la vegetación (liderada por un botánico) y del suelo (liderada por un agrónomo) se realizaron en mayo del 2021, junio del 2022 y diciembre del 2022, durante 23 días en cada fecha. Se tomaron muestras en siete

fragmentos con tres repeticiones, ningún fragmento se repitió en el mismo fundo seleccionado.

Cálculo de carbono en vegetación y suelo

Biomasa arbórea (MS/ha). Se realizó según la metodología de parcelas modificadas de Whittaker (1972) con las siguientes dimensiones: en el bosque primario, parcelas de 20 × 100 m (2000 m²); en los fragmentos de bosque secundario de 5, 10 y 15 años parcelas de 10 × 25 m (250 m²); en el sistema agroforestal de cacao parcelas de 10 × 20 m (200 m²); y para los fragmentos de pastura de braquiaria mejorada y pastura de braquiaria degradada se utilizaron parcelas circulares con un radio de 11.80 m (437.44 m²) (Rügnitz et al. 2009). Todas las especies inventariadas fueron georreferenciadas, identificadas taxonómicamente en campo, y se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de la planta (IPCC 2003, Rügnitz et al. 2009, Rügnitz 2011a).

La biomasa seca fue calculada por la ecuación alométrica para maderas duras de zonas tropicales húmedas y con intervalos de DAP de 5 a 148 cm, caracterizándose como zonas tropicales húmedas regiones con precipitaciones entre 2000 – 4000 mm/año en tierras bajas (Brown 1997). La ecuación alométrica utilizada fue:

$$Y = EXP(-2.289 + 2.649 * LN(DAP) - 0.021 * ((LN(0.6)) ^ 2))$$

Donde:

Y = Materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol.

DAP = Diámetro a la altura del pecho en cm.



Figura 2. Fragmentos de paisaje agropecuario identificados en los fundos para la medición de Carbono. (A) Bosque primario altamente talado. (B) Bosque secundario de 5 años procedente de pasturas. (C) Bosque secundario de 10 años procedente de pasturas. (D) Bosque secundario de 15 años procedente de pasturas. (E) Agroforestería con cacao y árboles maderables. (F) Pastizal de *Brachiaria decumbens* en producción. (G) Pastizal de *Brachiaria decumbens* degradado (con más de 70% de vegetación invasora y sin árboles).

Biomasa arbustiva y herbácea. Las especies arbustivas menores de 1.5 de DAP y las herbáceas se tomaron dentro de 1 m², cortando todas las especies a ras del suelo. (IPCC 2003, Rüginitz et al. 2009, Rüginitz 2011a)

Hojarasca y detritos. En 1 m² se colectó toda la hojarasca y el detrito (total de 4 m²), luego se separó en submuestras de 250 gramos para ser trasladado al laboratorio para su secado y cálculo de la materia seca (MS) (IPCC 2003, Rüginitz et al. 2009, Rüginitz 2011a).

Troncos caídos, árboles muertos parados y tocones muertos. En las parcelas para el inventario de la vegetación, se trazó dos franjas de 50 x 4 metros, a cada lado de la parcela. A los troncos caídos se les clasificaba como duro, mediano y suave dependiendo de la fase de descomposición; se calculó el volumen en m³ de cada tronco y se multiplicó por el factor 0.5, 0.3 y 0.15 según su clasificación respectivamente; para el caso de los árboles muertos parados y tocones muertos, se utilizó la ecuación alométrica para la vegetación arbórea (IPCC 2003, Rüginitz et al. 2009, Rüginitz 2011a).

Carbono en el suelo en t/ha. Para calcular el carbono en el suelo se utilizó la siguiente fórmula (IPCC 2003, Rüg-nitz et al. 2009, Rüg-nitz 2011a):

$$\text{Carbono en el suelo (t/ha)} = (\text{PVS} \times \%C \text{ en lab.}) / 1000$$

PVS = Peso Volumen del suelo

$$\text{PVS} = (\text{DA} \times \text{Prof. Horizonte} \times 10,000)$$

DA = Densidad aparente del suelo (g/cm^3).

DA = Peso seco/113.2

Profundidad del horizonte = 20 cm y 40 cm

C = Carbono orgánico del suelo en %, calculado en el laboratorio de suelos.

Para calcular la DA del suelo y el carbono orgánico se abrió una calicata de $1 \times 1 \times 0.50$ m de profundidad. La medición se realizó en los horizontes de: 0 a 20 cm; 20 a 40cm; (dos muestras por cada horizonte) utilizando cilindros de volumen conocido, las muestras fueron colocadas en bolsas de papel N.º 2 y pesadas en balanza analítica de precisión Ohaus; estas muestras fueron llevadas al laboratorio para el secado en estufa a 75°C durante 72 horas hasta obtener el peso constante, para luego realizar los cálculos respectivos. La densidad aparente del suelo es el peso seco de un volumen determinado de suelo expresado en gramos por centímetros cúbicos (g/cm^3). Las muestras para Carbono fueron colectadas en la misma calicata y en los mismos horizontes 100 gramos de suelo y enviados al laboratorio para el análisis respectivo (IPCC 2003, Rüg-nitz et al. 2009, Rüg-nitz 2011a).

Biomasa en las raicillas del suelo. Para medir esta variable se utilizaron cuadrantes de aluminio de $0.20 \times 0.20 \times 0.1$ m, en la calicata abierta se tomaron 8 muestras, dos cada 10 cm de profundidad, las muestras fueron trasladados al laboratorio donde se lavaron y tamizaron con un tamiz de 0.40 micras, luego fueron pesadas y llevadas a una estufa Ecocell y secadas a 75°C durante 72 horas (IPCC 2003, Rüg-nitz et al. 2009, Rüg-nitz 2011a).

Análisis físicos y químicos del suelo. En las mismas calicatas abiertas para medir DA y en los dos horizontes se midieron como variables concomitantes: Compactación del suelo con un penetrómetro de bolsillo; y para Textura, pH, P, MO, K, CIC, Al, se tomaron muestras combinadas colectadas en la parcela con un muestreador manual tipo berbiquí, las muestras fueron colocados en bolsas con cierre hermético y enviadas al laboratorio para los respectivos análisis (IPCC 2003, Rüg-nitz et al. 2009, Rüg-nitz et al. 2011a).

Análisis de los datos. Los datos obtenidos de todas las variables fueron normalizados en una hoja de cálculo del Software Excel®, en donde se calculó la cantidad de biomasa aérea en base seca de acuerdo con la metodología explicada, todos los cálculos fueron transformados a Materia Seca en TM/ha. Los valores de biomasa aérea en base seca se convirtieron a CO_2 utilizando el factor 0.5, de acuerdo con el IPCC (2003), Rüg-nitz et al. (2009), Rüg-nitz (2011a). Los datos de carbono total de los fragmentos se sometieron a ANOVA, utilizando el modelo matemático de

doble vía; las variables que resultaron con diferencias estadísticas significativas se sometieron a la prueba de promedios múltiples de Tukey ($p \leq 0.01$), solo en la variable carbono total se utilizó la prueba de contrastes ortogonales con las siguientes comparaciones:

- T1 Vs. T2, T3, T4, T5, T6, T7 (bosque primario vs. los tres bosques secundarios, agroforestería y los dos pastizales)
- T6, T7 Vs. T2, T3, T4, T5 (los dos pastizales vs. los tres bosques secundarios y agroforestería)
- T6 vs. T7 (pastizal de *B. decumbens* vs. pastizal de *B. decumbens* degradado)
- T5 vs. T2, T3, T4 (Agroforestería vs. bosque secundario de 15, 10 y 5 años)
- T2 vs. T3, T4 (bosque secundario de 15 vs. bosque secundario de 10 y 5 años)
- T3 vs. T4 (bosque secundario de 10 vs. y bosque secundario de 5 años)
- T1 = carbono en bosque primario;
- T2 = carbono en bosque secundario de 15 años
- T3 = carbono en bosque secundario de 10 años
- T4 = carbono en bosque secundario de 5 años
- T5 = carbono en agroforestería con cacao:
- T6 = pastizal de *B. decumbens* degradado
- T7 = pastizal de *B. decumbens*

Para el caso de carbono total almacenado en cada fragmento también se realizó un ANOVA de doble vía con polinomios ortogonales a fin de buscar el mejor ajuste de los datos a cualquier modelo (grado 1 a grado 5). De acuerdo con su significancia estadística se generó una ecuación de predicción utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios; considerando a la variable por años de recuperación del bosque secundario, partiendo de una pastura degradada con un valor 0 y el bosque primario con valor 20 y como variable y el carbono total almacenado.

Resultados

Carbono almacenado en fragmentos de paisaje agropecuario. Las cantidades de Carbono almacenado en los siete fragmentos del paisaje agropecuario como suma total de la parte aérea y del suelo fueron, en bosque primario 267.26 t/ha; en bosque secundario de 15 años 232.30 t/ha; en bosque secundario de 10 años 162.1 t/ha; en bosque secundario de 5 años 124.42 t/ha; en agroforestería con cacao 108.82 t/ha; en pastizal de *Brachiaria decumbens* 72.57 t/ha y en pastizal de *Brachiaria decumbens* degradada 60.47 t/ha. El análisis de la variancia nos muestra que hay diferencias significativas ($p \leq 0.0001$) entre las cantidades de carbono almacenado en los siete fragmentos, con $R^2 = 0.51$, y CV = 53.66% (Figura 3).

Para conocer las diferencias entre promedios del carbono almacenado entre los fragmentos se utilizó una prueba de contrastes ortogonales; encontrándose que el

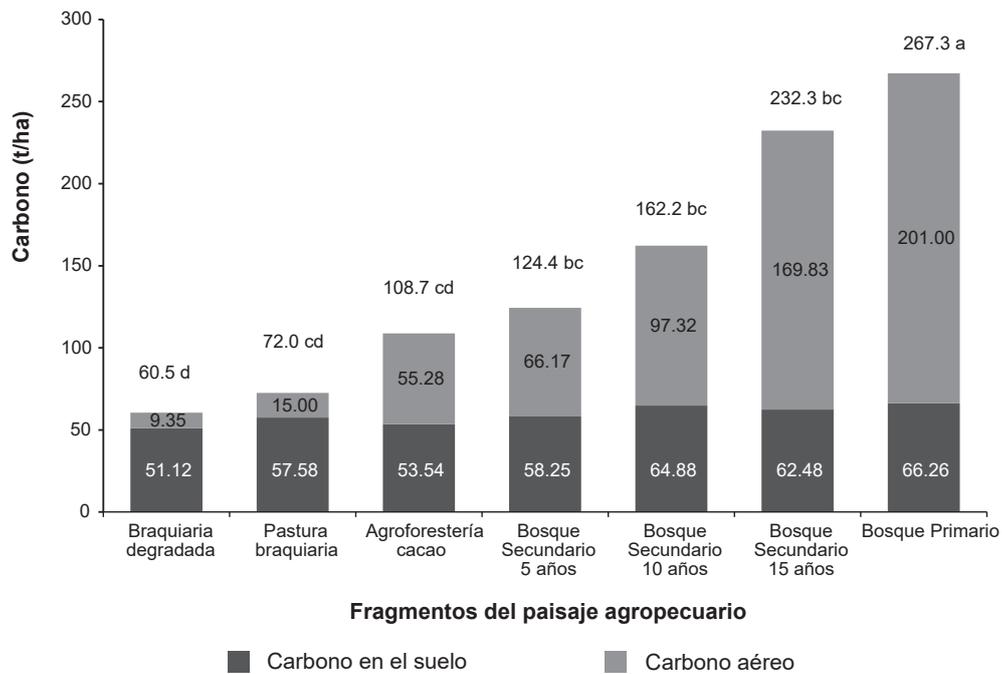


Figura 3. Carbono total (aéreo + suelo) almacenados en diferentes fragmentos del paisaje agropecuario en el departamento de Ucayali, Perú.

carbono almacenado en el fragmento de bosque primario supera significativamente ($p \leq 0.0001$) al promedio de carbono de todos los demás fragmentos. En promedio, el carbono almacenado en los bosques secundarios y agroforestería supera significativamente ($p \leq 0.0001$) al carbono almacenado en las pasturas con 156.91 t/ha y 66.52 t/ha, respectivamente; la cantidad de carbono almacenado en los bosques secundarios, supera significativamente ($p \leq 0.0392$) al carbono almacenado en el fragmento de agroforestería de cacao con 172.94 t/ha y 108.82 t/ha; similarmente el carbono almacenado en promedio en los bosques secundarios de 10 y 15 años es mayor altamente significativa al carbono almacenado en el bosque secundario de 5 años ($p \leq 0.0077$) con 232.6 t/ha y 143.26 t/ha respectivamente. No se encontró diferencias de carbono almacenado en ambas pasturas; tampoco se encontró diferencias significativas entre el carbono almacenado en el bosque secundario de 10 años y el bosque secundario de 15 años (Figura 4).

Se analizó la tendencia del almacenamiento de carbono en los fragmentos del paisaje agropecuario considerando como la variable independiente los años de recuperación del bosque secundario partiendo del fragmento de pastura degradada; el ANOVA con polinomios ortogonales muestra que hay una tendencia lineal positiva ($p \leq 0.0001$), con $R^2 = 0.48$ y $CV = 52.16\%$, siendo el modelo matemático que representa esta tendencia $Y = 70.12 + 10.12X$, donde Y es la cantidad de Carbono almacenado en el fragmento (t/ha) y X es el año de almacenamiento (Figura 5).

En la (Tabla 2) se presenta la estructura y composición botánica de la vegetación en los siete fragmentos estudiados obtenidos de los inventarios realizados. Se

observa una relación directamente proporcional entre el número de familias, especies e individuos con la edad de recuperación de los bosques secundarios.

Carbono almacenado en la parte aérea y en el suelo de siete fragmentos del paisaje agropecuario

La cantidad de carbono almacenado en la parte aérea (vegetación leñosa, herbácea y en el material muerto) (Figura 6) muestra diferencias significativas entre los valores de carbono aéreo encontrados en los diferentes fragmentos ($p \leq 0.0001$).

Se puede observar que en los fragmentos de pastizal en buen estado y en el pastizal degradado no tuvieron vegetación mayor de 5 cm de DAP, a diferencia de los fragmentos de bosque primario, los tres bosques secundarios y agroforestería. La prueba de promedios nos muestra que el carbono almacenado en los bosques secundarios de 10 y 15 años y el bosque primario presentan cantidades de carbono almacenados superiores altamente significativas con respecto al carbono almacenado en el bosque secundario de 5 años y agroforestería.

La cantidad de carbono almacenado en el suelo fue de 59.13 t/ha, presente como carbono orgánico (44.25 t/ha) y carbono en las raicillas de (14.25 t/ha). Este carbono orgánico almacenado en el suelo es 75% superior al aporte de las raicillas; el análisis de variancia no encuentra diferencias significativas de carbono almacenado entre los siete fragmentos del paisaje agropecuario, lo que significaría que el suelo es un importante depósito de carbono independiente del uso que haya tenido, o sí se encuentra en recuperación (Figura 7). Las características de textura, mutacional y químicas del suelo se muestran en las (Tabla 3 y Tabla 4).

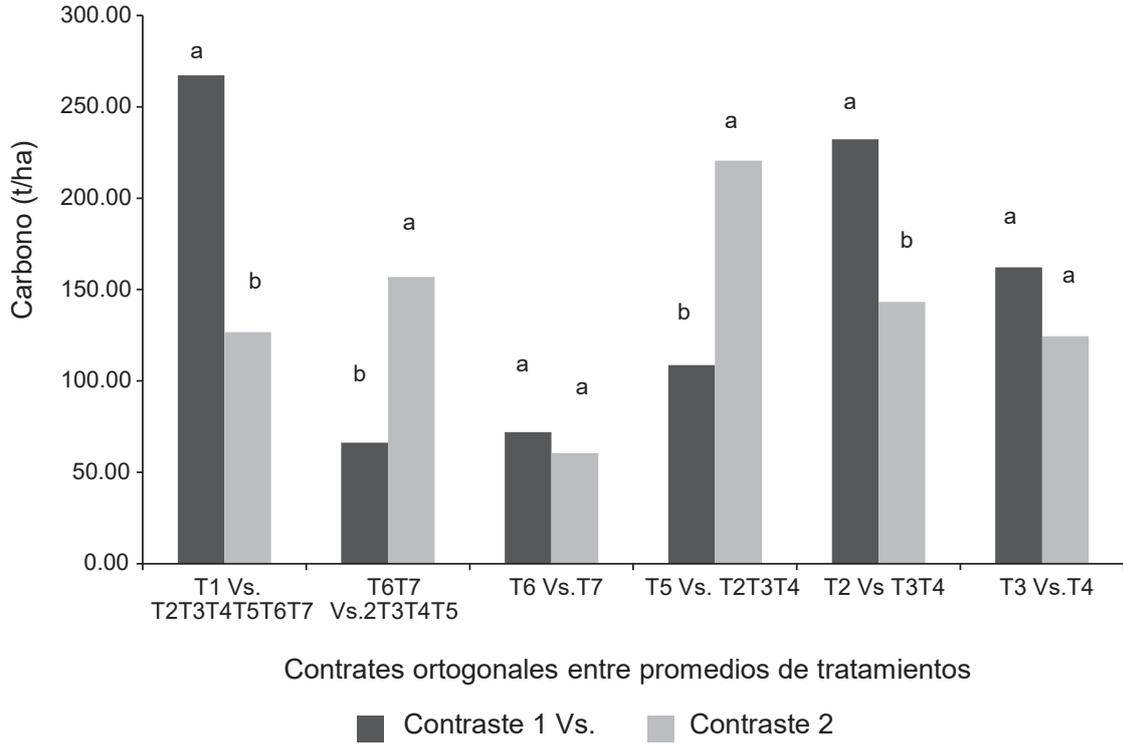


Figura 4. Prueba de contrastes ortogonales de carbono almacenado en siete fragmentos del paisaje agropecuario, departamento de Ucayali, Perú.

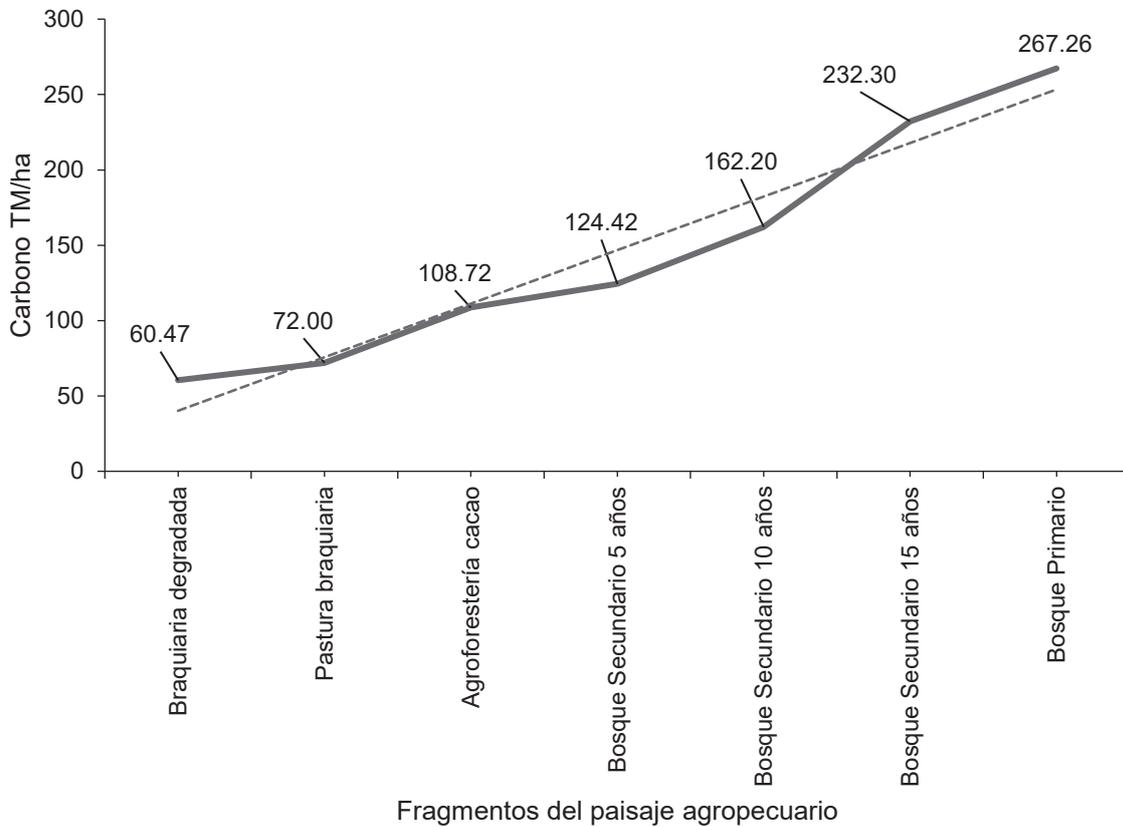


Figura 5. Tendencia del almacenamiento de Carbono en los fragmentos del paisaje agropecuario. departamento de Ucayali, Perú.

Tabla 2. Composición botánica de la vegetación existente en los fragmentos del paisaje agropecuario, departamento de Ucayali, Perú.

Fragmento	N.º Familias			N.º especies			N.º individuos/ha			Familias más abundantes	Especies más abundantes
	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
Bosque primario	31	36	24	62	73	67	3146	2861	3188	Fabaceae	<i>Senna multijuga</i>
										Moraceae	<i>Acacia lorentensis</i>
										Euphorbiaceae	<i>Allophylus divaricatus</i>
Bosque secundario 15 años	23	24	24	37	34	44	5739	5774	4192	Fabaceae	<i>Croton matourensis</i>
										Euphorbiaceae	<i>Bauhinia acreana</i>
										Boraginaceae	<i>Cordia ucayaliensis</i>
Bosque secundario 10 años	19	19	27	30	32	48	4067	3825	4315	Fabaceae	<i>Siparuna guianensis</i>
										Salicaceae	<i>Colubrina glandulosa</i>
										Siparunaceae	<i>Ryania speciosa</i>
Bosque secundario 5 años	16	17	18	21	26	31	5211	5239	2639	Annonaceae	<i>Apuleia leiocarpa</i>
										Euphorbiaceae	<i>Croton matourensis</i>
										Fabaceae	<i>Apeiba tibourbou</i>
Agroforestería Cacao	5	5	8	8	9	11	2306	1693	2128	Malvaceae	<i>Theobroma cacao</i>
										Musaceae	<i>Musa paradisiaca</i>
										Lamiaceae	<i>Vitex cymosa</i>
Pastizal de <i>B. decumbens</i>	2	5	11	4	4	18	38	30	213	Poaceae	<i>Brachiaria decumbens</i>
										Fabaceae	<i>Annona edulis</i>
										Annonaceae	<i>Nectandra aff. Globosa</i>
Pastizal de <i>B. decumbens</i> degradado	3	5	10	4	6	13	57	53	130	Poaceae	<i>Brachiaria decumbens</i>
										Asteraceae	<i>Chromolaena laevigata</i>
										Lamiaceae	<i>Inga thibaudiana</i>

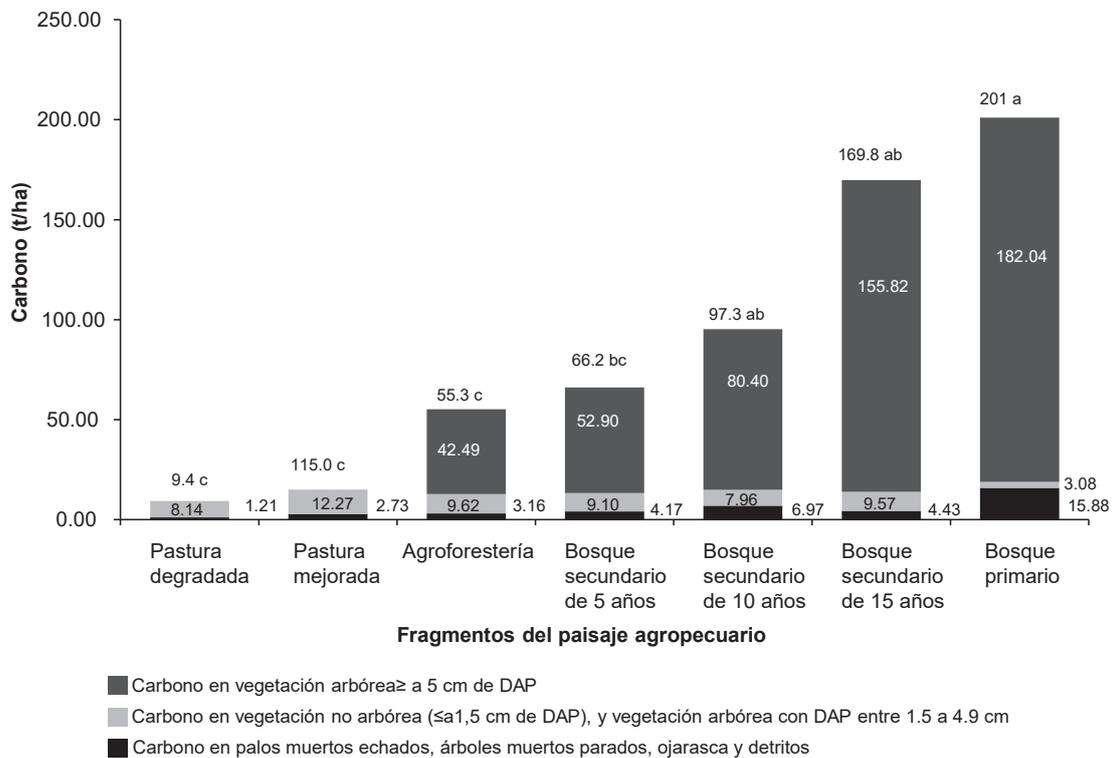


Figura 6. Carbono almacenado en la parte aérea medido en la vegetación leñosa, vegetación herbácea y material muerto, en el paisaje agropecuario, departamento de Ucayali, Perú.

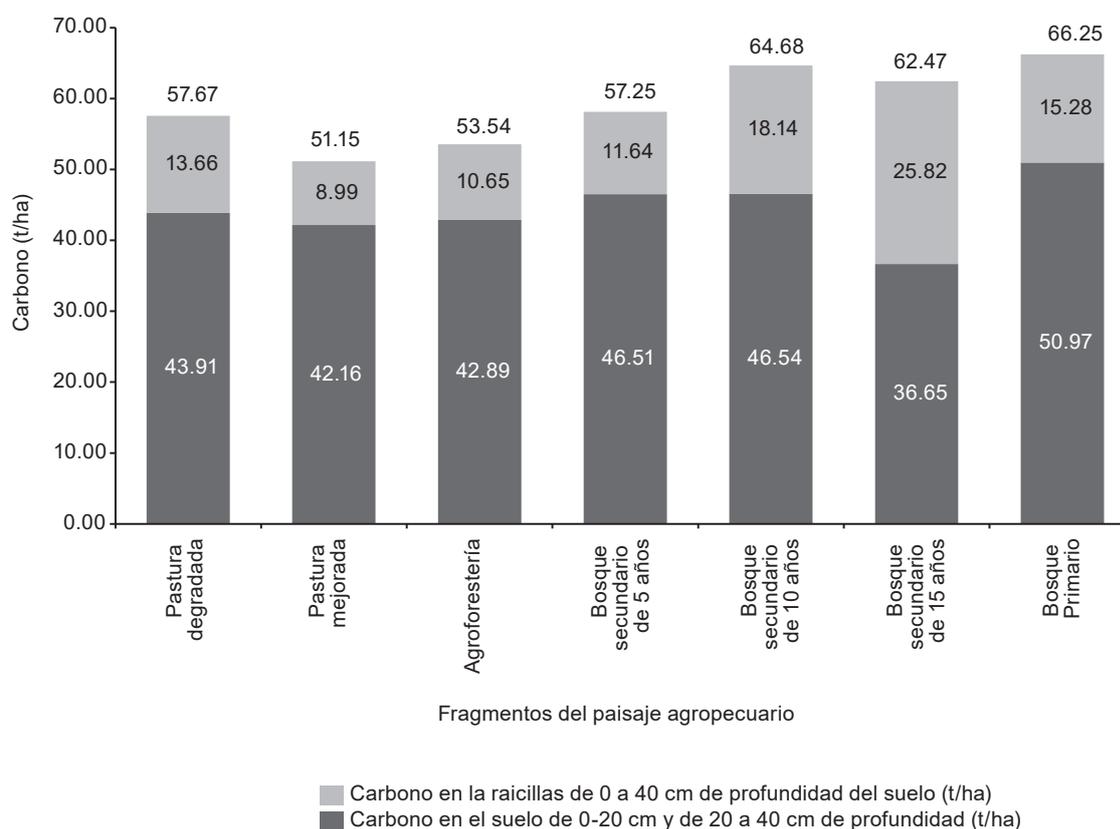


Figura 7. Carbono almacenado en el suelo medido como carbono orgánico y en las raicillas, en el paisaje agropecuario, departamento de Ucayali, Perú.

Discusión

Carbono total almacenado en los fragmentos del fundo agropecuario

Es conocido que los fragmentos del paisaje agropecuario amazónico secuestran y almacenan carbono tanto en la vegetación como sobre la superficie del suelo y en el suelo (Saatchi et al. 2011). La cantidad de carbono almacenado en el fragmento de bosque primario encontrado en nuestro estudio (267.3 t/ha) está en el rango de los valores reportados por Saatchi et al. (2007) para los bosques amazónicos, cuyos valores varían entre 100 y 300 toneladas de carbono, en relación con el tipo de bosque. Sin embargo, otros estudios como los de Yepes-Quintero et al. (2017) encuentran en bosques maduros tropicales de tierras bajas de América del Sur carbono almacenado entre 150 y 200 t/ha; en bosques primarios conservados, Rüginitz (2011a) encontró 327.57 t/ha de carbono almacenado; mientras que Cuellar y Salazar (2016) reportan cantidades menores con rangos de carbono entre 90.9 y 232.3 t/ha.

Los valores muy variables de carbono que reporta la literatura en relación con la cantidad de carbono en los bosques primarios podrían deberse a la intensidad de uso que los ganaderos le dan al bosque, ya que de él se agencian de leña, de madera para sus casas, postes o sinchinas para las cercas de los potreros y sombra para los animales (Murgueitio et al. 2003).

La cantidad de carbono calculado en los bosques secundarios de 5, 10 y 15 años en nuestro estudio en

un caso son menores a los encontrados en trabajos realizados anteriormente en Ucayali (Rüginitz 2011a), pero en otro son mayores (Cuellar et al. 2016). En otras regiones del mundo se han encontrado cantidades de carbono más altas (Susanto et al. 2023), lo que podría estar relacionado con las diferentes edades y orígenes de los bosques secundarios evaluados (Clavo et al. 2022). La capacidad de almacenar carbono de estos bosques procedentes de pasturas es muy alto, teniendo un incremento lineal positivo altamente significativo en relación a la edad de la pastura; esto podría deberse a la mayor cantidad y calidad de la vegetación en los bosques de mayor edad, ya que la ecuación alométrica utilizada en el cálculo de la biomasa vegetal considera al DAP como una variable importante, existiendo una mayor cantidad de especies de mayor DAP en los bosques secundarios de 10 y 15 años (Figura 6, Tabla 2). La rápida recuperación, la alta diversidad de especies y la capacidad de capturar carbono de estos bosques secundarios procedentes de uso en ganadería y con alta presión antrópica evidenciarían la alta resiliencia de estos bosques secundarios (Thompson et al. 2009), como lo demuestran las diferencias altamente significativas de cantidad de carbono en los bosques secundarios de 10 y 15 años versus lo encontrado en el bosque de 5 años encontrados en nuestro estudio.

Un fragmento importante del paisaje agropecuario en Ucayali es la agroforestería con *Theobroma cacao*, como una manera de diversificar las actividades familiares de los agricultores. La agroforestería es un siste-

Tabla 3. Características físicas del suelo de los fragmentos del paisaje agropecuario. Departamento de Ucayali, Perú.

Fragmento	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Bosque Primario	0 – 20	30.33	35.00	33.67	Franco arcilloso
	0 – 40	23.00	49.00	27.00	Arcilloso
B. Secundario 15 años	0 – 20	45.00	27.00	27.00	Franco arcilloso
	0 – 40	38.33	40.33	20.33	Franco arcilloso
B. Secundario 10 años	0 – 20	30.33	35.00	33.67	Franco arcilloso
	0 – 40	23.00	49.00	27.00	Arcilloso
B. Secundario 5 años	0 – 20	44.33	27.00	27.67	Franco arcilloso
	0 – 40	28.11	46.11	24.78	Franco arcilloso
Agroforestería cacao	0 – 20	40.33	29.00	29.67	Franco arcilloso arenoso
	0 – 40	34.33	39.67	25.00	Arcilloso
<i>B. decumbens</i>	0 – 20	41.00	29.00	29.00	Franco arcillosa
	0 – 40	40.33	35.67	23.00	Arcilloso
<i>B. decumbens</i> degradado	0 – 20	47.00	25.00	27.00	Franco arcilloso
	0 – 40	35.00	42.33	21.67	Arcilloso

Tabla 4. Características químicas y nutricionales del suelo de los fragmentos del paisaje agropecuario, departamento de Ucayali, Perú.

Fragmento	Prof.	pH	MO (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	CIC (me/100g)					Bas. Cam (%)	Ac. Camb (%)	Sat. Al (%)
							Ca	Mg	Al	H	ClCe			
Bosque Primario	0 – 20	4.55	1.50	0.07	4.76	49.04	4.08	0.58	4.23	0.93	9.82	47.67	52.33	42.9
	20 – 40	4.68	1.10	0.05	5.00	54.16	4.46	0.60	3.38	0.75	9.20	46.20	53.80	44.47
B. Secundario 15 años	0 – 20	4.10	1.30	0.06	4.60	52.86	5.01	0.68	3.83	0.76	10.3	55.16	44.84	37.39
	20 – 40	4.40	0.80	0.04	4.89	50.09	4.89	0.63	3.87	0.85	10.23	58.01	41.99	33.67
B. Secundario 10 años	0 – 20	4.69	1.50	0.07	4.89	65.75	5.00	0.57	3.1	0.75	9.42	60.99	39.01	31.42
	20 – 40	4.78	1.00	0.04	5.10	60.90	4.93	0.60	2.45	0.62	8.60	57.52	42.48	33.99
B. Secundario 5 años	0 – 20	4.32	1.40	0.06	5.75	57.10	4.38	0.58	3.57	0.79	9.33	53.33	46.77	38.28
	20 – 40	4.62	0.97	0.04	5.00	55.05	4.76	0.61	3.23	0.74	9.34	53.91	46.09	37.38
Agroforestería Cacao	0 – 20	4.66	1.40	0.06	5.56	67.80	4.62	0.64	3.04	0.64	8.94	59.94	40.06	33.26
	20 – 40	4.58	1.10	0.05	4.53	53.09	4.56	0.63	3.04	0.64	8.86	59.94	40.06	33.27
<i>B. decumbens</i>	0 – 20	4.51	1.20	0.05	5.32	61.56	4.97	0.61	2.67	0.59	8.83	63.86	36.14	29.68
	20 – 40	4.53	0.90	0.04	4.21	57.06	4.42	0.44	3.56	0.74	9.29	55.94	44.06	36.41
<i>B. decumbens</i> degradado	0 – 20	4.54	1.30	0.06	4.81	65.51	4.04	0.51	3.90	0.89	9.34	49.11	50.89	41.42
	20 – 40	4.51	0.80	0.04	4.10	53.51	5.02	0.61	3.19	0.68	9.50	56.58	43.42	35.39

ma que usa una asociación de especies de importancia para seguridad alimentaria, como la *Musa paradisiaca*, y en poca cantidades especies maderables como *Simarouba amara* *Dipteryx férrea*, o frutas como *Psidium guajava*, *Matisia cordata*. La cantidad de carbono calculado en nuestro estudio fue de 108 t/ha, y es menor a los reportados por Rüginitz et al. (2011a), Saj et al. (2013), Salvador-Morales et al. (2019), Surco-Huacachi y Garate-Quispe (2022). Sin embargo, todos esos estudios coinciden en que la variación del sistema de agroforestería depende de la edad, siendo mayor en las plantaciones de mayor edad, además, también se observa mayor biodiversidad y cantidad de especies con las que se asocian (Poveda et al. 2013, Zavala et al. 2018).

Los valores de carbono almacenado en ambas pasturas (en buen estado y degradado) son menores sig-

nificativamente comparadas con los otros fragmentos evaluados, esta diferencia significativa en menor cantidad de carbono total se debería a la menor cantidad de vegetación leñosa existente en la pastura, las que están dominadas por la pastura *B. decumbens* que es una especie que se reproduce por esquejes de porte herbácea rastrera. Aunque no se encontraron diferencias significativas entre las dos pasturas, existe una tendencia a almacenar mayor cantidad de carbono en la pastura de *Brachiaria* en buen estado lo que podría estar relacionado a la alta producción de forraje característica del pasto *Brachiaria*. Los valores calculados de carbono de 72.6 t/ha para la pastura de *Brachiaria* en buen estado de conservación y de 60.5 t/ha para la pastura de *Brachiaria* degradada son menores que lo encontrado por Rüginitz et al. (2011a), pero mayores a los observados por Cuellar y Salazar (2016). La variabilidad de

estos valores puede deberse a la época de evaluación, o a la edad y estado de conservación de la pastura. Pero, se conoce que los pastos tropicales como *B. decumbens* son importantes sumideros de carbono (Silva-Parra et al. 2020). En particular, en Ucayali aproximadamente el 99% de las pasturas son del género *Brachiaria*, de estas el 95% es *B. decumbens*. La dominancia de *Brachiaria* podría explicarse principalmente por su adaptación a suelos ácidos, resistente a la sequía, a la baja fertilidad del suelo y algo importante, su capacidad de secuestrar carbono, además de aumentar la eficiencia del uso de nitrógeno, deteniendo las emisiones de GEI (Renvoize et al. 1996, Jank et al. 2014, Njarui et al. 2016).

El almacenamiento de carbono y la recuperación de la vegetación son indicadores importantes en la recuperación de áreas deforestadas y áreas degradadas procedentes de pasturas (Rojas-Vargas et al. 2019, Calentano et al. 2020, Montes et al. 2021). En este estudio se ha generado un modelo de regresión lineal que muestra una relación positiva entre la cantidad de carbono almacenado y la edad de los bosques secundarios. Por otro lado, la recuperación de la diversidad botánica también es un buen indicador ya que, a mayor edad de los bosques, mayor es el número de familias y especies, notándose una leve declinación del número de individuos en el bosque primario que estaría relacionado a la desaparición de la vegetación herbácea por la falta de luz que ocasionan los árboles (Figura 5 y Tabla 2)

Carbono almacenado en la parte aérea y en el suelo de siete fragmentos del paisaje agropecuario

El carbono de la parte aérea en los fragmentos estudiados es el aporte de la vegetación leñosa, razón por lo cual el carbono total en el bosque primario y en los bosques secundarios, principalmente de 10 y 15 años, presentan una mayor proporción de carbono aéreo almacenado debido a que representa el 50% de la biomasa seca de la vegetación (Figura 6). Esto se explica por el incremento en el número de familias, especies e individuos leñosos con DAP mayores de 10 cm. Por otro lado, en las pasturas, el carbono almacenado en la parte aérea es pequeño, aproximadamente es el 30%, principalmente de *B. decumbens*, aunque existen especies invasoras de porte herbáceas, cuyo aporte en carbono es mínimo (Thompson et al. 2009, Rüginitz 2011a, Cuellar & Salazar 2016). La cantidad de carbono aéreo encontrado en este estudio es menor al encontrado por Rüginitz (2011a), con cantidades de carbono de 293 t/ha, 84.2 t/ha, 78.6 t/ha, 25.8 t/ha, 47,0 t/ha, para bosque primario, bosque secundario de 5 años, agroforestería, pastura de *Brachiaria* y pastura degradada respectivamente, sin embargo son mayores a los encontrados por Cuellar y Salazar (2016) con cantidades de carbono de 156.1 t/ha, 21.5 t/ha y 21.9 t/ha para bosque primario, bosque secundario de 5 años y pastura de *Brachiaria* respectivamente.

Con respecto a la cantidad de carbono en el suelo, del total almacenado el 75% es carbono orgánico y la diferencia es el aporte de las raicillas; el análisis de la variancia nos muestra que no existen diferencias significativas entre los siete fragmentos evaluados. Du et

al. (2018), Bai y Catrufo (2022) señalan que el almacenamiento de carbono en el suelo tiene una relación directa con la respiración del suelo, la cual es favorable en el bosque primario, en los bosques secundarios y agroforestería debido a que está influenciado por las propiedades físicas y químicas del suelo, siendo la textura y la porosidad del suelo los que determinan la estabilidad del carbono orgánico cambiando los procesos de descomposición microbiana (Wang et al. 2023). El otro proceso importante es la erosión del suelo debido al viento y a las altas precipitaciones que pueden influir en la pérdida de carbono (Delgado-Baquerizo et al. 2015). Sin embargo, estos procesos son favorables en los bosques y sistemas agroforestales por contar con vegetación que cubre el suelo.

Literatura citada

- Bai Y, MF Cotrufo. 2022. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. *Science* 377, 603–608. <https://doi.org/10.1126/science.aba2380>
- Batjes N. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal Soil Science*, pp. 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Blais AM, Lorrain S, Plourde Y, Varfalvy L. 2005. Organic Carbon Densities of Soils and Vegetation of Tropical, Temperate and Boreal Forests. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, Garneau M. (eds) *Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes*. Environmental Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-26643-3_7
- Brown S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. FAO Forestry Paper - 134. <http://www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e00.htm>
- Celentano D, Rousseau G, Paixão L, Lorencio F, Cardozo E, Rodriguez T, Silva H, Medina J, De Sousa T, Rocha A, Reis F. 2020. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems* 94, 1781–1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>.
- Clavo ZM, Vela J, Alvez-Valles C. 2022. Biodiversity Islands and Dominant Species in Agricultural Landscapes of the South Western Amazon, Perú. In: Montagnini, F. (eds) *Biodiversity Islands: Strategies for Conservation in Human-Dominated Environments*. Vol 20. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92234-4_9
- Cuellar J, Salazar E. 2016. Dinámica del carbono almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra en el Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA. Lima Perú. 217 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/363>
- Delgado-Baquerizo M, García-Palacios P, Milla R, Gallardod F, Maestre F. 2015. Soil characteristics determine soil carbon and nitrogen availability during leaf litter decomposition regardless of litter quality. *Soil Biology & Biochemistry*. 81, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.009>
- De Moraes KF, Lima MGM, Gonçalves GSR, Cerqueira PV, Santos MPD. 2024. The future of endemic and threatened birds of the Amazon in the face of global climate change. *Ecology and evolution*, 14(3), e11097. <https://doi.org/10.1002/ece3.11097>
- Du Y, Han H, Wang Y, Zhong M, Dafenghui, Niu S. 2018. Plant functional groups regulate soil respiration responses to nitrogen addition and mowing over a de-

- cade. *Functional Ecology* 32, 1117–1127. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13045>.
- Finer M, Mamani N. 2023. Deforestación y Fuegos en la Amazonía 2022. MAAP: 187. [revisado 29 abril 2024. https://www.maaproject.org/2023/amazonia-2022/](https://www.maaproject.org/2023/amazonia-2022/)
- Finer M, Mamani N. 2021. Pérdida y Protección de Carbono en la Amazonía Peruana. Proyecto Monitoreo de la Amazonía Andina (MAAP): 148. [maaproject.org. Revisado 4/12/2021. https://www.maaproject.org/2021/peru-carbono-amazonia](https://www.maaproject.org/2021/peru-carbono-amazonia)
- FAO (Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Italia), SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, Perú). 2017. Nuestros bosques en números: Primer reporte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (en línea). Lima, Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/nuestros-bosques-numeros>
- Guadalupe N, Seijas N, Díaz H. 2020. Estrategia Regional de Cambio Climático de Ucayali. Actualización 2019-2022. Autoridad Regional Ambiental – Ucayali, Pucallpa Perú. 84 p. <https://dar.org.pe/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Cambio-Climatico-Ucayali.pdf>
- Halliday JC, Tate KR, McMurtrie RE, Scott NA. 2003. Mechanisms for changes in soil carbon storage with pasture to *Pinus radiata* land-use change, *Global change biology*. 9(9), pp. 1294-1308. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00659.x>
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) 2003. Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura (GBP UT-CUTS). Métodos Complementarios y Orientación Sobre las Buenas Prácticas que Emanan del Protocolo de Kyoto. Capítulo 4. 132 pg. Consultado en 24 junio de 2008. Tomado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) 2018: Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Masson-Delmotte V, P. Zhai, H.-O. Pörtner, et al. Eds. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Jank L, Barrios SC, Valle CB do, Simeão RM, Alves GF. 2014. The value of improved pastures to Brazilian beef production. *Crop and Pasture Science* 65(11):1132–1137. <https://doi.org/10.1071/CP13319>
- Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2). pp. 423-436. [http://dx.doi.org/10.1890/1051-761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/1051-761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Lapola DM, Pinho P, Barlow J, Aragão LE, Berenguer E, Carmenta R, Liddy HM, Seixas H, Silva CV, Silva-Junior C, et al. 2023. The drivers and impacts of Amazon Forest degradation. *Science*, 379, eabp8622. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- Ma L, Hurtt GC, Tang H, Lamb R, Lister AJ, Chini LP, Dubayah RO, Armston J, Campbell E, Duncanson L, et al. 2023. Global Forest Aboveground Carbon Stocks and Fluxes from GEDI and ICESat-2, 2018-2021. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNL-DAAC/2180>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2016. El Perú y el Cambio Climático. Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Lima, Perú. 329 p. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/05/Tercera-Comunicacion-C3%B3n.pdf>
- Murgueitio E, Ibrahim M, Ramírez E, Zapata A, Mejía CE, Casasola F. 2003. Usos de la tierra en fincas ganaderas. Guía para el pago de servicios ambientales en el proyecto, Enfoques silvopastoriles integrados para el manejo de ecosistemas. Fundación Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria CIPAV, Carrera 2ª oeste # 11-54 Cali, Colombia.
- Njarui DM, Gichangi EM, Ghimire SR, et al. 2016. Climate Smart Brachiaria Grasses for Improving Livestock Production in East Africa – Kenya Experience. Proceedings of the workshop held in Naivasha, Kenya, 14 – 15 setiembre. Nairobi, Kenya. 271 p
- Poveda V, Orozco L, Medina C, Cerda R, Lopez A. 2013. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49, 42-50. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5760>
- Pavan K, Sharma LK, Pandey PC, Sinha S, Nathawat MS. 2013. Geospatial strategy for tropical forest-wildlife reserve biomass estimation. *IEEE Journal Selected Topics Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 6(2). pp. 917-923. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2221123>
- Perruchoud D, Joos F, Fischlin A, Hajdas I, Bonani G. 1999. Evaluating timescales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data. *Global Biogeochem. Cycles*, 13(2) pp. 555-573. <https://doi.org/10.1029/1999GB90003>
- Ramachandran PK, Mohan B, Vimala D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), pp. 10-23. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200800030>
- Renvoize SA, Clayton WD, Kabuye CHS. 1996. Morphology, taxonomy, and natural distribution of *Brachiaria* (Trin.) Griseb. In: Miles JW, Maass BL, Valle CB, Kumble V. (eds.). *Brachiaria: Biology, agronomy, and improvement*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Campo Grande, BR : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte, Cali, CO. 1-15. (CIAT publication no. 259). <https://hdl.handle.net/10568/82022>
- Rojas-Vargas E, Silva-Agudelo E, Guillén-Motta A, Motta-Delgado P. 2019. Carbono almacenado en estrato arbóreo de sistemas ganaderos y naturales del municipio de Albania, Caquetá, Colombia. *Ciencia y Agricultura* 16(3):35-46. <https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n3.2019.9515>
- Rügnitz M. 2011(a). Medición de biomasa para determinar las reservas de carbono de los diferentes tipos de uso y cobertura del suelo presentes en el distrito de Irazola y la Comunidad Indígena Sinchi Roca. ICRAF-ASB, UNU, REALU. <http://www.worldagroforestry.org/>
- Rügnitz MT, 2011(b). Aprendiendo sobre Pagos por Servicios Ambientales Fundamentos para la elaboración de proyectos de carbono forestal. Agroforestería para la Adaptación y Mitigación al Cambio Climático, ICRAF - World Agroforestry Center. <http://www.worldagroforestry.org/>
- Rügnitz MT, Chacón ML, Porro R. 2009. Guía para la Determi-

- nación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p. <http://www.worldagroforestry.org/>
- Saatchi SS, Houghton RA, Alvalá DS, Soares JV, Yu Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology* 13:816–837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x>
- Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ET, Salas W, Zutta BR, Buermann W, Lewis SL, Hagen S. et al. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings National Academy Sciences* 108 (24):9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Saatchi S, Mascaro J, Xu L, Keller M, Yang Y, Duffy P, Espiritoso F, Baccini A, Chambers J, Schimel D. 2015. Seeing the forest beyond the trees. *Global Ecology and Biogeography*. 24 (5): 606–610. <https://doi.org/10.1111/geb.12256>
- Saj S, Jagoret P, Todem H. 2013. Carbon storage and density dynamics of associated trees in three contrasting Theobroma cacao agroforests of Central Cameroon Agroforest Systems. 87(6): 1309–1320. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9639-4>
- Salvador-Morales P, Cámara-Cabrales L, Martínez-Sánchez JL, Sánchez-Hernández R, Valdés-Velarde. 2019. Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera bosques* 25(1):e2511638. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Silva-Parra A, Mora-Delgado J, Barrera-Rojas LM. 2020. Predicción de emisiones y sumideros de CO₂ del suelo debido a factores de manejo del suelo de pastizales de *Brachiaria decumbens* utilizando la Metodología de Nivel 2 del IPCC. *Revista Medicina Veterinaria Zootecnia*. 67 (1):72–87. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v67n1.87689>
- Surco-Huacachi O, Garate-Quipe JS. 2022. Reservas de carbono en cuatro sistemas agroforestales combinadas con *Theobroma cacao* L., Madre de Dios. *Revista Amazónica De Ciencias Básicas y Aplicadas* 1(1): <https://doi.org/10.55873/racba.v1i1.147>.
- Susanto SA, Maturbongs AC, Budirianto HJ, Sriwidodo ET, Kilmaskossu A, Penwidiyanti P. 2023. Biomass and Carbon Stocks in Post-Agriculture Secondary Forest in Manokwari, West Papua, Indonesia. *Jurnal Biologi Tropics*. 23(4):357–365. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i4.5631>
- Thompson I, B. Mackey. S. McNulty, et al. 2009. Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Montreal: Secretaría of Convention on Biological Diversity. Technical Series no. 43, 67 pages. <https://www.un-redd.org/sites/default/files/2021-10/cbd-ts-43-en.pdf>
- Tuomisto H. 1993. Clasificación de vegetación en la Selva Baja Peruana. *Amazonía Peruana. Vegetación húmeda tropical en el llano Sub Andino*. Risto Kalliola, Maarit Puhakka, Walter Danjoy (eds). Publicado por Proyecto Amazonía, Universidad de Turko y la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima, Peru. Pp. 103–112. <https://www.mobot.org/MOBOT/Research/curators/pdf/Gentry-Ortiz-1993.pdf>
- Wang Y, Wang Z, Li H, Shen T, Zhang X, Li J, Han G. 2023. Grazing decreased soil organic carbon by decreasing aboveground biomass in a desert steppe in Inner Mongolia. *Journal of Environmental Management*. 347:119112. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119112>
- Whittaker R.H. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*. v. 21, n. 2/3, p. 213–251. <https://www.jstor.org/stable/1218190>
- Yepes-Quintero A, Duque-Montoya AJ, Navarrete-Encinales D, Phillips-Bernal J, Cabrera-Montenegro E, Corrales-Osorio A, Alvarez-Davila E, Galindo-García G, García-Davila MC, Idárraga A. et al. 2017. Estimación de las reservas y pérdidas de carbono por deforestación en los bosques del departamento de Antioquia. *Colombia. Actualidades Biológicas*. 33(95): 193–208. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14306>
- Zavala W, Merino E, Peláez P. 2018. Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono. *Scientia Agropecuaria*. 9(4): 493–501. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.04>

Agradecimientos / Acknowledgments:

Los autores agradecen a FONDECYT por financiar parcialmente este proyecto de investigación, al Grupo de Investigación Sistemas Silvopastoriles y Biodiversidad Amazónica (SISBA) de la Universidad Nacional de Ucayali, al Grupo de Investigación en Sistemas Aéreos No Tripulados (GISANT) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y al Grupo de Investigación Biodiversidad Conservación y Producción Sostenible (BIOCOPS) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por el soporte técnico y logístico; a los productores ganaderos señores Félix Inga, José Cabrera, Presentación Cabrera, Guadalberto Quispe, Margarita Advíncola, Santos Cueva y Ernesto Morón por el apoyo incondicional brindado para la toma de muestras en su fundo; al Ingeniero Rogel Abdías Collahuacho Quichua por liderar la logística y el trabajo de campo para la toma de las muestras; a la Señora Cecilia Ríos Pizarro por su incansable trabajo administrativo, logística y apoyo en el laboratorio y al Dr. José Luis Rodríguez por la revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

JVA: conceptualización, metodología, investigación, curación de datos, escritura-preparación de borrador original, redacción-revisión y edición, Administración de proyecto, adquisición de fondos
ZMC: conceptualización, metodología, investigación, curación de datos, redacción-revisión y edición, adquisición de fondos.
NRF: metodología, investigación.
PPV: administración de proyecto, redacción-revisión y edición.
CSV: conceptualización, metodología, investigación, curación de datos, redacción-revisión y edición, adquisición de fondos.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Este estudio se realizó como parte del proyecto de investigación "Desarrollo de metodología para el monitoreo de CO₂ utilizando sensoramiento remoto en paisajes agropecuarios con fines de conservación y mitigación al cambio climático, en la Provincia de Padre Abad, región Ucayali, Perú" que parcialmente fue financiado por el CONCYTEC con contrato N° 117-2020-FONDECYT.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber violado u omitido normas éticas o legales al realizar la investigación y esta obra.