

ARTÍCULO ORIGINAL

Carbono elemental de tres especies forestales del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la selva, Tingo María

Carlos Josue Castre Morales¹ | Wilfredo Tello Zevallos² | Tania Elizabeth Guerrero Vejarano²

Filiación Institucional

¹. Gobierno Regional de Huánuco-dirección regional de agricultura - Unidad de Gestión Forestal y Fauna Silvestre-Huánuco.

². Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María - Perú

Palabras clave:

Biomasa aérea,
Contenido de carbono,
Densidad básica de
la madera, Especies
forestales tropicales,
Secuestro de CO₂

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el contenido de carbono elemental en tres especies forestales del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), Tingo María: *Casearia ulmifolia*, *Hevea guianensis* y *Jacaranda copaia*. Se recolectaron muestras de xilema de 33 árboles, 11 individuos por especie, obteniéndose 66 cilindros de madera. La densidad básica se determinó mediante el método gravimétrico y el carbono elemental con un analizador elemental orgánico; la biomasa aérea se estimó mediante un modelo alométrico y el CO₂ equivalente mediante la relación estequiométrica CO₂/C. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre especies ($p < 0,01$). La mayor densidad básica se registró en *H. guianensis* ($0,560 \pm 0,008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), seguida de *C. ulmifolia* ($0,532 \pm 0,007 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), mientras que *J. copaia* presentó el menor valor ($0,304 \pm 0,011 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). El carbono elemental fue mayor en *C. ulmifolia* ($54,6 \pm 0,4 \%$), seguido de *H. guianensis* ($47,9 \pm 0,4 \%$) y *J. copaia* ($46,2 \pm 0,7 \%$). *H. guianensis* presentó la mayor acumulación en la clase de 50–60 cm, con $1400,6 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ de biomasa aérea, $670,9 \text{ kg C} \cdot \text{árbol}^{-1}$ y $2459,9 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{árbol}^{-1}$. Se concluye que las especies evaluadas presentan potencial diferenciado para almacenar carbono.

The Elemental Carbon of Three Forest Species from the Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva in Tingo María

Key words:

aboveground biomass,
carbon storage,
Elemental carbon,
tropical forests, wood
basic density.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the elemental carbon content of three forest species from the Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), Tingo María: *Casearia ulmifolia*, *Hevea guianensis*, and *Jacaranda copaia*. Xylem samples were collected from 33 trees, with 11 individuals per species, obtaining 66 wood cores. Basic density was determined using the gravimetric method, and elemental carbon was measured with an organic elemental analyzer. Aboveground biomass was estimated using an allometric model, and CO₂ equivalent was calculated through the CO₂/C stoichiometric ratio. The results showed significant differences among species ($p < 0.01$). The highest basic density was recorded in *H. guianensis* ($0.560 \pm 0.008 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), followed by *C. ulmifolia* ($0.532 \pm 0.007 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), whereas *J. copaia* showed the lowest value ($0.304 \pm 0.011 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Elemental carbon was highest in *C. ulmifolia* ($54.6 \pm 0.4 \%$), followed by *H. guianensis* ($47.9 \pm 0.4 \%$) and *J. copaia* ($46.2 \pm 0.7 \%$). *H. guianensis* showed the highest accumulation in the 50–60 cm diameter class, with $1400.6 \text{ kg} \cdot \text{tree}^{-1}$ of aboveground biomass, $670.9 \text{ kg C} \cdot \text{tree}^{-1}$, and $2459.9 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{tree}^{-1}$. It is concluded that the evaluated species have differentiated potential for carbon storage.

Citar como: Castre Morales, C. J., Tello Zevallos W. & Guerrero Vejarano T. E. Carbono elemental de tres especies forestales del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la selva. Revista de Investigación y Amazonía. 2026, 16(2):03-13. DOI: <https://doi.org/10.69507/revia.1.16.2>.

INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales cumplen una función estratégica en la mitigación del cambio climático, debido a su capacidad para almacenar carbono en la biomasa vegetal y contribuir a la regulación del ciclo global del carbono. En este escenario, contar con estimaciones confiables del carbono almacenado en los bosques resulta necesario para mejorar los inventarios de gases de efecto invernadero y respaldar acciones de conservación, restauración y reducción de emisiones. El IPCC (2022) señala que las actividades vinculadas con la agricultura, la forestería y otros usos de la tierra pueden contribuir de manera importante a la mitigación del cambio climático, tanto mediante la disminución de emisiones como a través del aumento de las remociones de carbono. En la misma línea, la FAO (2024) resalta que una gestión forestal sostenible requiere información de calidad, herramientas técnicas adecuadas y evidencia científica que sirva de apoyo para la toma de decisiones.

A nivel mundial, los bosques siguen cumpliendo un papel importante en la captura y almacenamiento de carbono, aunque esta capacidad puede variar según el tipo de bosque, su estado de conservación y los procesos de regeneración que ocurren en cada ecosistema. Panetal. (2024) señalaron que el sumidero forestal global se ha mantenido relativamente estable en las últimas décadas, aunque también identificaron cambios en la participación de los bosques tropicales intactos y de aquellos en proceso de recuperación. Por su parte, Feng et al. (2025), Wu et al. (2024) y Li et al. (2024) muestran que los estudios sobre carbono forestal han aumentado de manera sostenida; sin embargo, todavía existen limitaciones relacionadas con la precisión de las estimaciones, las escalas de evaluación, la incorporación de características estructurales del bosque y la disponibilidad de información local. En este sentido, disponer de datos específicos sobre biomasa, densidad de la madera y contenido de carbono por especie puede mejorar la confiabilidad de los inventarios forestales y de las estimaciones de CO₂ equivalente.

La cantidad de carbono almacenado en una especie forestal está relacionada con características del árbol y de su madera, como el diámetro a la altura del pecho, la altura total, la densidad básica y la proporción de carbono presente en los tejidos leñosos. A pesar de ello, todavía es común utilizar factores generales de conversión, como asumir que el 50 % de la biomasa corresponde a carbono. Este criterio puede generar diferencias en las estimaciones cuando no se toma en cuenta la variación que existe entre especies, tipos de tejido, zonas geográficas y condiciones ambientales. En ese sentido, Paroshy et al. (2021) evidenciaron que la concentración de carbono en la madera varía entre especies y se relaciona con gradientes climáticos, mientras que Doraisami et al. (2022), mediante la base global

GLOWCAD, reportaron una amplia variabilidad en la concentración de carbono de tejidos leñosos a partir de registros de numerosas especies arbóreas. Por tanto, el uso de valores específicos de carbono permite mejorar la precisión de las estimaciones forestales.

En los últimos años, diversos estudios han cuestionado la aplicación generalizada de factores constantes para la estimación de carbono en madera. Doraisami et al. (2024) señalaron que las fracciones refinadas de carbono de la madera pueden mejorar la confiabilidad de las estimaciones forestales a diferentes escalas, especialmente cuando se dispone de información taxonómica y mediciones directas. De manera complementaria, Van Schaik et al. (2024) demostraron que las fracciones reales de carbono en madera pueden diferir de los valores convencionales usados en la contabilidad de carbono, lo que evidencia la necesidad de realizar mediciones empíricas en materiales leñosos. Bajo este contexto, la determinación del carbono elemental en especies forestales tropicales adquiere importancia científica y técnica, ya que permite reducir la incertidumbre en la estimación de biomasa, carbono almacenado y dióxido de carbono equivalente.

La densidad básica de la madera es un aspecto importante al momento de estimar la biomasa y el carbono almacenado en los árboles, ya que puede variar entre especies y reflejar diferencias en la forma en que estas construyen y mantienen sus tejidos leñosos. Mo et al. (2024) señalan que esta propiedad está relacionada con las estrategias de uso del carbono, la productividad y la capacidad de almacenamiento de los bosques. Por ello, trabajar con valores propios de densidad básica y contenido de carbono para cada especie puede mejorar las estimaciones, especialmente en bosques tropicales con alta diversidad, donde las especies difieren en su estructura de madera, ritmo de crecimiento, biomasa acumulada y cantidad de carbono almacenado.

En la Amazonía peruana, investigaciones recientes han resaltado la importancia de los árboles como uno de los principales componentes en el almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales. Vallejos-Torres et al. (2024) reportaron que los bosques secundarios y los sistemas agroforestales con árboles de sombra presentan potencial para almacenar carbono en la región San Martín. Asimismo, Lozano et al. (2026) señalaron que los árboles de mayor diámetro concentran una proporción importante del carbono almacenado en bosques de la Amazonía peruana, lo que confirma la necesidad de incorporar variables dasométricas en las estimaciones de biomasa y carbono. A nivel local, Alva Rodríguez (2025) estimó la biomasa aérea, el carbono forestal y el CO₂ equivalente en bosques naturales de Tingo María mediante inventarios forestales, ecuaciones alométricas e imágenes satelitales Landsat 9. Por su parte, Meza Sanabria (2024) evaluó la densidad básica de Hevea

guianensis, *Casearia ulmifolia* y *Jacaranda copaia* en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, proporcionando información local sobre una propiedad física fundamental de la madera.

Sin embargo, los antecedentes locales disponibles han abordado de manera separada la densidad básica de la madera y la estimación del carbono a escala de bosque. En este sentido, Meza (2024) estudió la densidad básica de estas mismas tres especies en el BRUNAS, aportando información importante sobre las características de su madera. Sin embargo, en ese estudio no se evaluó directamente cuánto carbono contiene la madera de cada especie. A partir de esta necesidad, el presente trabajo incorpora la determinación del carbono elemental y relaciona esta información con la densidad básica y las características de los árboles, con el propósito de obtener estimaciones más precisas de biomasa, carbono almacenado y CO₂ equivalente.

Esta diferencia cobra importancia porque asumir que toda la biomasa contiene una fracción de carbono de 0,50 puede generar estimaciones poco precisas cuando las especies presentan valores distintos. Contar con información propia para cada especie permite estimar con mayor precisión el carbono almacenado y conocer mejor el aporte de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* dentro del BRUNAS. En este sentido, la principal contribución del presente estudio consiste en determinar experimentalmente la fracción de carbono de estas especies e integrarla con la densidad básica y las características dasométricas de los árboles evaluados.

Por ello, el objetivo de este estudio fue determinar el contenido de carbono elemental de *Casearia ulmifolia*, *Hevea guianensis* y *Jacaranda copaia* en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, e integrar las fracciones de carbono obtenidas con la densidad básica y la biomasa aérea estimada para calcular el carbono aéreo almacenado y el CO₂ equivalente por árbol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de ejecución del trabajo de investigación

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Fitoquímica Forestal de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicada en Tingo María, Huánuco, Perú. Las muestras de madera fueron recolectadas en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), área de conservación universitaria donde se realizó previamente el inventario forestal y la selección de las especies evaluadas.

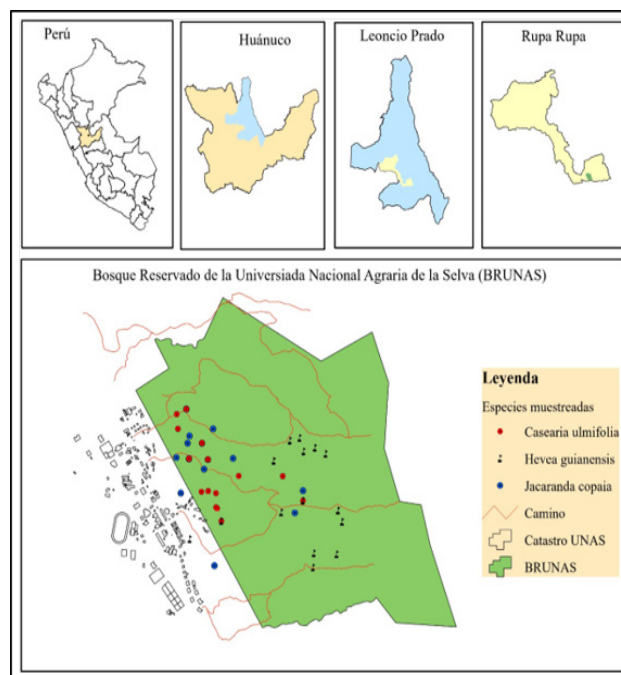


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Metodología

Selección de especies y muestreo forestal

El inventario forestal se realizó mediante un muestreo sistemático en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS). El tamaño de muestra se calculó mediante la fórmula propuesta por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), considerando un nivel de confianza de 95 %, una probabilidad de ocurrencia de 50 %, una probabilidad de no ocurrencia de 50 %, un error de muestreo de 10 % y una población de 21 722 unidades potenciales de muestreo. La unidad de muestreo correspondió a parcelas de 100 m² (10 × 10 m), en las cuales se registraron los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o superior a 10 cm.

Como resultado del cálculo muestral, se establecieron 96 parcelas distribuidas sistemáticamente en el área de estudio. A partir del inventario se identificaron las especies más abundantes y se seleccionaron tres especies forestales representativas: *Casearia ulmifolia* Vahl ex Vent., *Hevea guianensis* Aubl. y *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don. Para cada especie se seleccionaron 11 individuos, de acuerdo con los criterios de selección y colección de muestras establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 251.008 (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2016), totalizando 33 árboles evaluados.

Los 11 árboles de cada especie fueron considerados para la determinación de la densidad básica y la estimación de la biomasa aérea. Para la determinación del contenido de carbono elemental se

utilizó una submuestra de tres árboles independientes por especie, seleccionados entre los 11 individuos previamente evaluados, totalizando nueve árboles. Cada árbol seleccionado para el análisis elemental constituyó una repetición biológica independiente.

Medición dasométrica y extracción de muestras de xilema

El diámetro a la altura del pecho (DAP) se midió a 1,30 m sobre el nivel del suelo mediante una cinta diamétrica. La altura total de cada árbol se determinó con un telémetro láser Nikon Forestry Pro II, utilizando la función de medición de altura del equipo, y se expresó en metros. Los valores de DAP y altura total obtenidos para cada individuo fueron empleados posteriormente en la estimación de la biomasa aérea.

En cada árbol seleccionado se extrajeron dos cilindros de madera en posiciones opuestas del fuste. Los cilindros obtenidos se consideraron submuestras del mismo individuo y no repeticiones biológicas independientes. Las muestras de xilema se extrajeron a la altura del DAP mediante un barreno de Pressler, introducido perpendicularmente al fuste hasta alcanzar el radio del árbol.

Los cilindros fueron codificados y colocados individualmente en tubos de plástico para evitar pérdidas de humedad y daños durante el transporte. Posteriormente, se almacenaron en recipientes de poliestireno expandido y se trasladaron al laboratorio para su procesamiento. Los orificios producidos por el barreno fueron tratados con fungicida y sellados con cera de abeja como medida de protección fitosanitaria.

Determinación de la densidad básica de la madera

La densidad básica se determinó mediante el método empírico descrito por Valencia-Manzo y Vargas-Hernández (1997), considerando cada muestra extraída con barreno como un cilindro de 5,15 mm de diámetro. Las muestras se procesaron en condición húmeda, por encima del punto de saturación de las fibras.

En cada cilindro se midió la longitud mediante un vernier mecánico. El volumen húmedo se calculó considerando la geometría cilíndrica de la muestra mediante la siguiente ecuación:

$$V_v = 3.1416 \cdot D^2 \cdot L / 4000$$

Donde:

V_v : Volumen del húmedo cilindro (cm³)
D : Diámetro del cilindro (mm)
L : Longitud del cilindro (mm)

Posteriormente, las muestras se secaron en estufa a 105 ± 3 °C hasta alcanzar masa constante. La masa anhidra se determinó mediante una balanza analítica y la densidad básica se calculó con la siguiente ecuación:

$$D_b = P_o / V_v$$

Donde:

D_b : Densidad básica de la madera (g/cm³)

P_o : Masa anhidra de la muestra (g)

V_v : Volumen húmedo del cilindro (cm³)

La densidad básica se calculó individualmente para los dos cilindros extraídos de cada árbol. Posteriormente, ambos valores se promediaron para obtener una única observación representativa por individuo. En consecuencia, la unidad experimental fue el árbol, con 11 repeticiones biológicas por especie y 33 árboles en total.

Evaluación del contenido de carbono elemental

El contenido de carbono elemental se determinó a partir de muestras de xilema procedentes de tres árboles independientes por especie, seleccionados entre los 11 individuos evaluados. Cada muestra correspondió a un árbol diferente y fue procesada separadamente, sin mezclar material procedente de distintos individuos. Por tanto, se consideraron tres repeticiones biológicas por especie (n=3), totalizando nueve muestras biológicas (N=9).

Las muestras de xilema fueron transformadas en aserrín, secadas y homogeneizadas antes del análisis. La determinación se realizó mediante un analizador elemental orgánico FlashSmart Thermo Scientific, empleando los estándares de calibración Sulfanilimide STD y Vanadium Pentoxide, de acuerdo con el protocolo del equipo. Las muestras fueron codificadas individualmente según la especie y el árbol de procedencia.

Para cada determinación se pesaron aproximadamente entre 2,7 y 3,0 mg de muestra seca, los cuales fueron colocados en cápsulas de estaño y acondicionados con el auxiliar de combustión correspondiente. Los resultados se expresaron como porcentaje de carbono respecto de la masa seca (% C).

Las tres repeticiones de cada especie correspondieron a muestras procedentes de tres árboles diferentes y no a tres lecturas analíticas de una misma muestra. El porcentaje de carbono elemental se transformó posteriormente en fracción de carbono mediante la siguiente relación:

$$F_c = \frac{\%C}{100}$$

Donde:

F_c: fracción de carbono de la especie.

%C: contenido de carbono elemental expresado en porcentaje.

Para cada especie se calculó una fracción media de carbono a partir de los tres árboles analizados. Esta fracción media se utilizó posteriormente para estimar el carbono aéreo de los 11 árboles evaluados por especie.

Estimación de biomasa aérea, carbono aéreo y dióxido de carbono equivalente

La biomasa aérea de cada uno de los 33 árboles se estimó mediante el modelo alométrico propuesto por Chave et al. (2014), el cual integra la densidad básica de la madera, el diámetro a la altura del pecho y la altura total del árbol:

$$Ba = 0,0673 * (\delta D^2 H)^{0,976}$$

Dónde:

Ba : Biomasa arbórea aérea (kg/árbol)

D : Diámetro a la altura del pecho (cm)

δ : Densidad básica de la madera (g/cm³)

H : Altura total (m)

Para cada árbol se utilizó el valor de densidad básica obtenido del promedio de los dos cilindros de madera. La biomasa aérea fue calculada individualmente y posteriormente agrupada según la especie y la clase diamétrica.

El carbono aéreo almacenado se estimó multiplicando la biomasa aérea individual por la fracción media de carbono elemental determinada experimentalmente para cada especie:

$$Ca = Ba * Fc$$

Dónde:

Ca : Carbono aéreo (kg/árbol)

Ba : Biomasa arbórea aérea (kg/árbol)

Fc : Fracción de carbono

Aunque el contenido de carbono elemental se determinó en tres árboles por especie, la fracción media obtenida se aplicó a la biomasa aérea de los 11 individuos correspondientes a cada especie.

Finalmente, el dióxido de carbono equivalente se estimó mediante la relación estequiométrica entre el peso molecular del CO₂ y el peso atómico del carbono:

$$CO_2 = Ca * \frac{\text{Peso molecular del } CO_2}{\text{Peso atómico del C}}$$

Dónde:

CO₂: Dióxido de carbono secuestrado (kg/árbol)

Ca : Carbono aéreo (kg/árbol)

Variables en estudio

La variable independiente correspondió a la especie forestal, con tres niveles: *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*. Las variables dependientes fueron la densidad básica de la madera (g·cm⁻³), el contenido de carbono elemental (%), la biomasa aérea estimada (kg·árbol⁻¹), el carbono aéreo almacenado (kg C·árbol⁻¹) y el dióxido de carbono equivalente (kg CO₂·árbol⁻¹).

Análisis estadístico

Los datos se organizaron según la especie forestal y la variable evaluada, considerando al árbol como unidad experimental. Para la densidad básica se utilizaron 11 árboles por especie, totalizando 33 individuos; los valores obtenidos de los dos cilindros extraídos de cada árbol se promediaron para obtener una sola observación por individuo. Para el contenido de carbono elemental se utilizaron tres árboles independientes por especie, totalizando nueve repeticiones biológicas. Antes del análisis de varianza, se verificó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Levene. En ambos casos se cumplieron los supuestos requeridos para la aplicación del análisis de varianza ($p > 0,05$).

Las diferencias en la densidad básica y el contenido de carbono elemental entre las especies se evaluaron separadamente mediante un análisis de varianza de un factor, considerando a la especie forestal como factor con tres niveles. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Duncan con un nivel de significancia de $p < 0,01$. La biomasa aérea, el carbono aéreo y el CO₂ equivalente se analizaron descriptivamente por especie y clase diamétrica, debido a que las especies no estuvieron representadas en las mismas clases de diámetro. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat, versión 2020p, desarrollado por el Grupo InfoStat de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

RESULTADOS

Densidad básica y contenido de carbono elemental de tres especies forestales

La densidad básica de la madera presentó diferencias altamente significativas entre las especies evaluadas ($p < 0,001$). *Hevea guianensis* y *Casearia ulmifolia* conformaron el mismo grupo estadístico, con valores de $0,560 \pm 0,008$ y $0,532 \pm 0,007$ g·cm⁻³, respectivamente; mientras que *Jacaranda copaia* presentó una densidad básica significativamente menor, con $0,304 \pm 0,011$ g·cm⁻³. Para esta variable se evaluaron 11 árboles por especie, considerando como valor representativo de cada individuo el promedio de los dos cilindros extraídos.

El contenido de carbono elemental, determinado en tres árboles independientes por especie, también presentó diferencias significativas ($p < 0,01$). *Casearia ulmifolia* registró el mayor contenido de carbono elemental, con $54,6 \pm 0,4$ %, mientras que *Hevea guianensis* y *Jacaranda copaia* presentaron valores de $47,9 \pm 0,4$ % y $46,2 \pm 0,7$ %, respectivamente, y conformaron el mismo grupo estadístico.

Estos resultados evidencian que la densidad básica y el contenido de carbono elemental presentan comportamientos diferentes entre las especies evaluadas. Debido a que el análisis elemental se

realizó con tres árboles por especie, los resultados deben interpretarse considerando el tamaño de la muestra analizada.

Tabla 1. Densidad básica y contenido de carbono elemental de tres especies forestales del BRUNAS.

Especie	Familia	Densidad básica (g·cm ⁻³)	Duncan	Carbono elemental (%)	Duncan
<i>Hevea guianensis</i>	Euphorbiaceae	0,560 ± 0,008	a	47,9 ± 0,4	b
<i>Casearia ulmifolia</i>	Salicaceae	0,532 ± 0,007	a	54,6 ± 0,4	a
<i>Jacaranda copaia</i>	Bignoniaceae	0,304 ± 0,011	b	46,2 ± 0,7	b

Nota: Los valores representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas según la prueba de Duncan ($p < 0,01$).

La biomasa aérea estimada presentó valores mayores en las clases diamétricas superiores. Entre los individuos evaluados, el valor más alto correspondió a *H. guianensis* en la clase de 50–60 cm. Sin embargo, este resultado no debe interpretarse exclusivamente como un efecto de la especie, debido a que las especies no estuvieron representadas en las mismas clases diamétricas y la

estimación de biomasa depende directamente del DAP, la altura total y la densidad básica de la madera. En *C. ulmifolia*, los individuos se concentraron en las clases de 10–20 y 20–30 cm; *H. guianensis* presentó individuos hasta la clase de 50–60 cm; mientras que *J. copaia* estuvo representada entre las clases de 20–30 y 40–50 cm (Tabla 2 y Figura 2).

Tabla 2. Biomasa aérea estimada por especie y clase diamétrica

Especie	10–20 cm	20–30 cm	30–40 cm	40–50 cm	50–60 cm
<i>C. ulmifolia</i>	51,2 ± 7,2 a	250,0 ± 98,0 b	—	—	—
<i>H. guianensis</i>	45,8 ± 8,8 a	196,0 ± 27,2 b	470,6 ± 87,3 c	—	1400,6 ± 64,4 d
<i>J. copaia</i>	—	213,7 ± 15,6 a	426,7 ± 62,0 b	575,6 ± 44,9 c	—

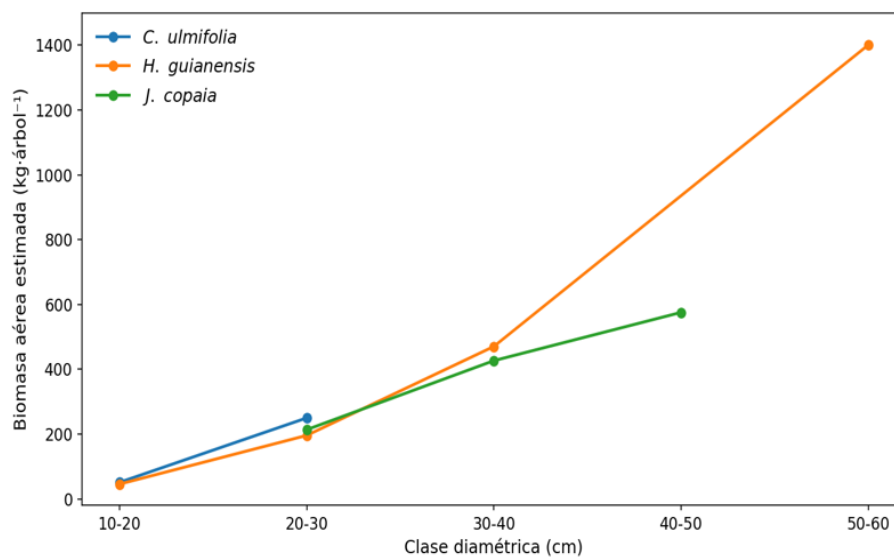


Figura 2. Tendencia de la biomasa aérea estimada por especie y clase diamétrica.

Carbono aéreo almacenado y CO₂ equivalente

La biomasa aérea, el carbono aéreo almacenado y el CO₂ equivalente mostraron valores progresivamente mayores en las clases diamétricas superiores dentro de cada especie. Entre los individuos evaluados, los valores más altos correspondieron a *Hevea guianensis* en la clase de 50–60 cm, con 1400,6 kg·árbol⁻¹ de biomasa aérea, 670,9 kg C·árbol⁻¹ de carbono aéreo y 2459,9 kg CO₂·árbol⁻¹ de CO₂equivalente. En *Casearia ulmifolia*, los mayores valores se registraron en la clase de 20–30 cm, mientras que en *Jacaranda copaia* correspondieron a la clase de 40–50 cm (Tabla 3).

Estos resultados deben interpretarse de manera

descriptiva y en función del tamaño de los árboles evaluados, debido a que las especies no estuvieron representadas en las mismas clases diamétricas. Por tanto, los mayores valores observados en *H. guianensis* no demuestran por sí solos una mayor capacidad intrínseca de almacenamiento de carbono de la especie, sino que responden principalmente a la presencia de individuos con mayor diámetro y altura. Asimismo, el carbono aéreo y el CO₂ equivalente dependieron de la biomasa estimada y de la fracción media de carbono elemental determinada para cada especie. En consecuencia, la acumulación por árbol estuvo condicionada por la interacción entre el tamaño del individuo, la densidad básica de la madera y la fracción de carbono.

Tabla 3. Biomasa aérea, carbono aéreo almacenado y CO₂ equivalente por especie y clase diamétrica

Especie	Clase diamétrica	Biomasa aérea	Carbono aéreo	CO ₂ equivalente
		(kg·árbol ⁻¹)	(kg C·árbol ⁻¹)	(kg CO ₂ ·árbol ⁻¹)
<i>C. ulmifolia</i>	10–20 cm	51,2	27,9	102,5
<i>C. ulmifolia</i>	20–30 cm	250,0	136,5	500,5
<i>H. guianensis</i>	10–20 cm	45,8	22,0	80,7
<i>H. guianensis</i>	20–30 cm	196,0	93,9	344,3
<i>H. guianensis</i>	30–40 cm	470,6	225,5	826,8
<i>H. guianensis</i>	50–60 cm	1400,6	670,9	2459,9
<i>J. copaia</i>	20–30 cm	213,7	98,6	361,5
<i>J. copaia</i>	30–40 cm	426,7	197,0	722,3
<i>J. copaia</i>	40–50 cm	575,6	265,7	974,2

DISCUSIÓN

Densidad básica y contenido de carbono elemental

Las diferencias observadas en el contenido de carbono elemental evidencian que la concentración de carbono en la madera constituye una característica específica de cada especie y no depende exclusivamente de su densidad básica. *Casearia ulmifolia* presentó la mayor concentración de carbono elemental, aunque su densidad básica fue ligeramente inferior a la de *Hevea guianensis*. Este resultado demuestra que la cantidad de masa seca contenida por unidad de volumen y la proporción de carbono presente en dicha masa representan propiedades relacionadas, pero no equivalentes. En consecuencia, una madera de mayor densidad no necesariamente presenta una mayor concentración porcentual de carbono.

Desde una perspectiva fisiológica, las diferencias en el carbono elemental podrían estar asociadas con

variaciones interespecíficas en la composición y organización de los tejidos leñosos, así como con distintas estrategias de asignación del carbono fijado durante la fotosíntesis. Las especies pueden diferir en la proporción de carbono destinada a la formación de tejidos estructurales y compuestos químicos de la madera. Sin embargo, el presente estudio no determinó lignina, celulosa, hemicelulosa ni extractivos; por ello, estas posibles explicaciones deben considerarse hipótesis ecológicas y fisiológicas que requieren ser evaluadas mediante análisis químicos complementarios. La variabilidad observada coincide con Paroshy et al. (2021) y Doraisami et al. (2022), quienes demostraron que la concentración de carbono en los tejidos leñosos varía entre especies y condiciones ambientales.

La densidad básica de la madera también permite reconocer diferencias en la forma en que las especies desarrollan sus tejidos. Los valores más altos encontrados en *H. guianensis* y *C. ulmifolia* muestran una mayor cantidad de materia seca por unidad de volumen. En términos ecológicos, las especies con madera más densa suelen destinar más recursos a

formar tejidos resistentes y duraderos, mientras que especies con madera menos densa pueden favorecer un crecimiento más rápido y una ocupación más temprana del espacio disponible. En este sentido, la menor densidad observada en *Jacaranda copaia* podría estar relacionada con este tipo de estrategia. Sin embargo, esta interpretación debe tomarse con cautela, ya que en el presente estudio no se evaluaron directamente variables como crecimiento, mortalidad o longevidad. Este comportamiento es similar a lo señalado por Mo et al. (2024), quienes relacionan la densidad de la madera con la forma en que los árboles distribuyen sus recursos y con la dinámica del bosque.

Además, los resultados muestran que la densidad básica y el contenido de carbono no necesariamente siguen el mismo patrón. Mientras *H. guianensis* presentó la mayor densidad básica, *C. ulmifolia* registró el mayor contenido de carbono elemental. Esto indica que no es suficiente utilizar solo la densidad de la madera para interpretar cuánto carbono puede almacenar una especie. Para obtener una estimación más adecuada, es necesario considerar de manera conjunta la biomasa del árbol y la proporción real de carbono presente en esa biomasa.

Biomasa aérea, carbono y CO₂ equivalente

El aumento de la biomasa aérea en las clases diamétricas superiores es coherente con la estructura del modelo alométrico de Chave et al. (2014), debido a que el DAP interviene elevado al cuadrado, junto con la altura total y la densidad básica de la madera. Por ello, el patrón observado era esperable matemáticamente y no constituye, por sí mismo, evidencia de un efecto independiente de la especie. Los altos valores registrados en los individuos de *H. guianensis* pertenecientes a la clase de 50–60 cm responden a la combinación de su densidad básica y el mayor tamaño de los árboles muestreados. Esta tendencia también es coherente con Lozano et al. (2026), quienes demostraron en bosques de la Amazonía peruana que los árboles grandes concentran una proporción importante del carbono forestal. Por ello, los altos valores observados en *H. guianensis* se explican por la combinación de mayor densidad básica y presencia de individuos en clases diamétricas superiores.

Esta tendencia también es coherente con estudios recientes que destacan la importancia de la estructura vegetal en la estimación de biomasa y carbono. Cachay y Eckhardt (2025) encontraron que el almacenamiento de carbono aéreo en bosques montanos del Perú disminuye con la intensificación del uso del suelo y se relaciona con variables estructurales de la vegetación. De manera complementaria, Atalaya et al. (2025) demostraron que variables como la altura y el DAP, estimadas mediante UAV-LiDAR, permiten mejorar la estimación de biomasa aérea y carbono en sistemas

agroforestales peruanos. Asimismo, Esquivel-Muelbert et al. (2025) reportaron un incremento del tamaño promedio de los árboles en parcelas amazónicas, lo que refuerza la importancia de considerar la estructura diamétrica en los estudios de biomasa, carbono aéreo y CO₂ equivalente.

A escala de bosque, Alva Rodríguez (2025) estimó altos valores de biomasa aérea, carbono forestal y CO₂ equivalente en bosques naturales de Tingo María mediante inventarios forestales, ecuaciones alométricas e imágenes Landsat 9, lo que respalda el potencial del BRUNAS como reservorio de carbono. Aunque dicho estudio trabajó a escala de bosque y el presente análisis se enfoca en especies individuales, ambos resultados coinciden en resaltar la importancia de integrar variables dasométricas y densidad de madera para mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa.

Entre los individuos evaluados, los mayores valores de carbono aéreo y CO₂ equivalente correspondieron a *Hevea guianensis* en la clase diamétrica de 50–60 cm. Sin embargo, este resultado debe interpretarse en función del tamaño de los árboles muestreados y no como evidencia de una capacidad intrínseca superior de la especie. Al tratarse de un bosque natural, las especies no estuvieron representadas en las mismas clases diamétricas y el diámetro y la altura total intervienen directamente en el modelo utilizado para estimar la biomasa. Por ello, la mayor acumulación observada en *H. guianensis* estuvo relacionada principalmente con la presencia de individuos de mayor tamaño, además de su elevada densidad básica.

En contraste, *Casearia ulmifolia* presentó la mayor fracción de carbono elemental, pero los individuos evaluados se concentraron en clases diamétricas inferiores, lo que limitó su acumulación total de carbono por árbol. Este comportamiento demuestra que la concentración porcentual de carbono en la madera y la cantidad total de carbono almacenado representan componentes diferentes. La primera depende de la proporción de carbono contenida en la masa seca, mientras que la segunda está determinada por la interacción entre la biomasa del individuo y la fracción de carbono de la especie. En consecuencia, una especie puede presentar una elevada concentración de carbono elemental y, al mismo tiempo, registrar menor carbono aéreo por árbol cuando sus individuos poseen menor diámetro, altura o biomasa acumulada.

La importancia del tamaño y de la estructura del componente arbóreo coincide con estudios realizados en ecosistemas amazónicos. Vallejos-Torres et al. (2024) registraron reservas relevantes de carbono en bosques secundarios y sistemas agroforestales con árboles de sombra en la Amazonía peruana, mientras que Salgado Veramendi et al. (2025) encontraron mayores existencias de carbono en cafetales con árboles que en sistemas sin sombra. De manera

complementaria, Clemente-Arenas (2022) y Ramos-Quispe et al. (2025) evidenciaron que los sistemas agroforestales amazónicos pueden almacenar cantidades importantes de carbono en su biomasa aérea. Aunque estos estudios se desarrollaron a escala de sistema y no de especie, sus resultados respaldan que la presencia, el tamaño y la distribución de los árboles constituyen factores determinantes en la acumulación de carbono.

En los sistemas silvopastoriles de la Amazonía peruana, Díaz Pablo et al. (2024) encontraron que el carbono no se concentra en un solo componente, sino que se encuentra distribuido entre el suelo y la vegetación. De manera similar, Suárez et al. (2026) y Díaz-Cháux et al. (2025) señalaron que la cantidad de carbono almacenado también está relacionada con la composición de los árboles, la forma en que se organiza el sistema productivo y las características del paisaje. Estos antecedentes permiten entender que el almacenamiento de carbono responde a varios factores en conjunto, entre ellos el tamaño y número de los árboles, la biomasa que desarrollan y las condiciones propias del lugar donde crecen.

También es importante diferenciar el carbono aéreo del CO₂ equivalente. El primero corresponde al carbono contenido en la biomasa seca del árbol, mientras que el segundo expresa ese carbono en términos de dióxido de carbono mediante la relación 44/12. Martin et al. (2021), Doraisami et al. (2024) y Doraisami et al. (2025) señalaron que la proporción de carbono presente en la madera puede cambiar entre especies, tipos de tejido y condiciones de la muestra. Por esta razón, trabajar con valores obtenidos directamente para cada especie puede ofrecer estimaciones más ajustadas que el uso de un único factor de conversión para todos los casos.

También es importante diferenciar el carbono aéreo del CO₂ equivalente. El primero corresponde al carbono contenido en la biomasa seca del árbol, mientras que el segundo expresa ese carbono en términos de dióxido de carbono mediante la relación 44/12. Martin et al. (2021), Doraisami et al. (2024) y Doraisami et al. (2025) señalaron que la proporción de carbono presente en la madera puede cambiar entre especies, tipos de tejido y condiciones de la muestra. Por esta razón, trabajar con valores obtenidos directamente para cada especie puede ofrecer estimaciones más ajustadas que el uso de un único factor de conversión para todos los casos.

Esta diferencia también es importante cuando los resultados se utilizan en inventarios de carbono forestal. Si se asumiera una fracción fija de 0,50 para todas las especies, el carbono podría ser subestimado en *C. ulmifolia*, cuya fracción media fue de 0,546, y sobreestimado en *H. guianensis* y *J. copaia*, con

valores de 0,479 y 0,462, respectivamente. Aunque la diferencia puede parecer pequeña cuando se observa un solo árbol, puede hacerse más importante cuando las estimaciones se amplían a muchos individuos o a superficies mayores de bosque. Por ello, disponer de valores propios para cada especie puede contribuir a mejorar la precisión de los inventarios regionales y nacionales de carbono y gases de efecto invernadero.

Sin embargo, los valores obtenidos en este estudio deben considerarse como una referencia local, ya que el carbono elemental se determinó en tres árboles por especie. Para comprobar si estos valores pueden utilizarse de manera más amplia será necesario evaluar un mayor número de individuos, diferentes tamaños de árboles, otras posiciones dentro del fuste y distintas condiciones ambientales. Aun con esta limitación, los resultados muestran que las tres especies no presentan la misma proporción de carbono y resaltan la importancia de considerar conjuntamente la biomasa del árbol, la densidad básica de la madera y su contenido de carbono al realizar este tipo de estimaciones.

CONCLUSIONES

Hevea guianensis y *Casearia ulmifolia* presentaron las mayores densidades básicas, con $0,560 \pm 0,008$ y $0,532 \pm 0,007$ g·cm⁻³, respectivamente, mientras que *Jacaranda copaia* registró $0,304 \pm 0,011$ g·cm⁻³. En contraste, el mayor contenido de carbono elemental correspondió a *C. ulmifolia* con $54,6 \pm 0,4$ %, seguido de *H. guianensis* con $47,9 \pm 0,4$ % y *J. copaia* con $46,2 \pm 0,7$ %, evidenciando que una mayor densidad de la madera no implica necesariamente una mayor proporción de carbono.

La biomasa aérea aumentó en las clases diamétricas superiores, alcanzando el mayor valor en *H. guianensis* de 50–60 cm, con $1400,6 \pm 64,4$ kg·árbol⁻¹. Sin embargo, este resultado debe interpretarse considerando que las especies no estuvieron representadas en las mismas clases de diámetro, por lo que la diferencia observada está asociada principalmente al tamaño de los individuos evaluados.

El mayor carbono aéreo y CO₂ equivalente se registró en *H. guianensis* de 50–60 cm, con $670,9$ kg C·árbol⁻¹ y $2459,9$ kg CO₂·árbol⁻¹. La diferencia entre las fracciones de carbono de las especies muestra la importancia de utilizar valores específicos, ya que asumir una fracción fija de 0,50 podría subestimar el carbono de *C. ulmifolia* y sobreestimarlo en *H. guianensis* y *J. copaia*.

REFERENCIAS

- Alva Rodríguez, Y. (2025). *Estimación de biomasa aérea y carbono forestal con imágenes satelitales Landsat 9 (2023) en bosques naturales de Tingo María – Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/3481>
- Atalaya, N., Sanchez, T., Goñas, M., Tineo, D., Taboada, V. H., Cabrera, H., Cruz, J., Ganoza, J. J., & Gómez, D. (2025). Estimation of aboveground biomass and carbon sequestration in a cocoa agroforestry system using UAV-LiDAR in northwestern Peru. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 40, Article 101750. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101750>
- Cachay, W., & Eckhardt, K. I. (2025). Impact of land use on aboveground carbon storage in a tropical montane forest in Central Andes of Peru. *Landscape Online*, 100, 1137. <https://doi.org/10.3097/LO.2025.1137>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clemente-Arenas, E. R. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. *Revista Forestal del Perú*, 37(1), 54–68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Díaz Pablo, M. E., Alegre Orihuela, J. C., Gómez Bravo, C. A., Mendoza Tamani, P., & Arévalo-Hernández, C. O. (2024). Carbon stocks in three silvopastoral systems in the Peruvian Amazon. *Manglar*, 21(3), 305–311. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.033>
- Díaz-Cháux, J. T., Velasquez-Valencia, A., & Casanoves, F. (2025). Influence of landscape structure on carbon storage in agroforestry systems with cacao and silvopastoral systems in the Colombian Amazon. *PLOS ONE*, 20(6), e0325477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325477>
- Doraisami, M., Domke, G. M., & Martin, A. R. (2024). Improving wood carbon fractions for multiscale forest carbon estimation. *Carbon Balance and Management*, 19, Article 25. <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00272-2>
- Doraisami, M., Kish, R., Paroshy, N. J., Domke, G. M., Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2022). A global database of woody tissue carbon concentrations. *Scientific Data*, 9, Article 284. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01396-1>
- Doraisami, M., Thomas, S. C., Gorgolewski, A. S., & Martin, A. R. (2025). The importance of the volatile carbon fraction in estimating deadwood carbon concentrations. *Forest Ecology and Management*, 581, Article 122555. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122555>
- Esquivel-Muelbert, A., Banbury Morgan, R., Brien, R., Gloor, E., Lewis, S. L., Dexter, K. G., Almeida, E., et al. (2025). Increasing tree size across Amazonia. *Nature Plants*. <https://doi.org/10.1038/s41477-025-02097-4>
- Feng, Y., Liu, J., Hu, H., Cui, P., Zhou, H., Ma, B., Liu, Z., & Chen, D. (2025). Global patterns in forest carbon storage estimation: Bibliometric analysis of technological evolution, accuracy gains and scaling challenges. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8, Article 1649356. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1649356>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of the world's forests 2024: Forest-sector innovations towards a more sustainable future*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>
- Ibargüen-Restrepo, Y. J., Mena-Mosquera, V. E., & Pino-Bejarano, W. A. (2023). Determinación de fracción de carbono de especies forestales de tres bosques del departamento de Chocó, Colombia. *Colombia Forestal*, 26(1), 22–35. <https://doi.org/10.14483/2256201X.18673>
- Instituto Nacional de Calidad. (2016). *Madera y carpintería para construcción. Selección y colección de muestras (NTP 251.008:2016)*. INACAL. <https://www.gob.pe/13452-acceder-al-catalogo-virtual-de-normas-tecnicas-peruanas-y-textos-afines>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Li, J., Wang, J., He, S., Liu, C., & Liu, L. (2024). Using knowledge graphs to analyze the characteristics and trends of forest carbon storage research at the global scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(7), Article 234. <https://doi.org/10.3390/ijgi13070234>
- Lozano, A., Gaona-Jiménez, N., Alvarado, J. W., García-González, P., Arévalo, A. A., Ordoñez, L., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Vilela, L., Tuesta-Hidalgo, O. A., Baselly-Villanueva, J. R., Chuchon-Remon, R., Águila, S. R.-D., Marín, C., & Vallejos-Torres, G. (2026). Dominance of large trees in carbon storage of Peruvian Amazon forest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8, Article 1711078. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1711078>
- Martin, A. R., Domke, G. M., Doraisami, M., & Thomas, S. C. (2021). Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications*, 12, Article 889. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>

- Meza Sanabria, M. D. (2024). *Densidad básica de tres especies forestales del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María-Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/3043>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación*. Ministerio del Ambiente. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2498-evaluacion-de-la-exactitud-tematica-del-mapa-de-deforestacion>
- Mo, L., Crowther, T. W., Maynard, D. S., van den Hoogen, J., Ma, H., Bialic-Murphy, L., Liang, J., de-Miguel, S., Nabuurs, G.-J., Reich, P. B., Phillips, O. L., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., Alberti, G., Almeyda Zambrano, A. M., Alvarado, B. V., Alvarez-Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Alves, L. F., ... Zohner, C. M. (2024). The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. *Nature Ecology & Evolution*, 8, 2195–2212. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02564-9>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Houghton, R. A., Fang, J., Kauppi, P. E., Keith, H., Kurz, W. A., Ito, A., Lewis, S. L., Nabuurs, G.-J., Shvidenko, A., Hashimoto, S., Lerink, B. J. W., Schepaschenko, D., Castanho, A., & Murdiyarso, D. (2024). The enduring world forest carbon sink. *Nature*, 631(8021), 563–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
- Paroshy, N. J., Doraisami, M., Kish, R., Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2021). Carbon concentration in the world's trees across climatic gradients. *New Phytologist*, 232(2), 728–739. <https://doi.org/10.1111/nph.17587>
- Ramos-Quispe, Y.-L., Alarcon-Aguirre, G., & Garate-Quispe, J. (2025). Estimation of anthropogenic carbon dioxide emissions and aboveground carbon stocks in agroforestry cacao production systems in the southeastern Peruvian Amazon. *Journal of Ecological Engineering*, 26(8), 408–421. <https://doi.org/10.12911/22998993/204006>
- Salazar, R., Alegre, J., Pizarro, D., Duff, A. J., García, C., & Gómez, C. (2024). Soil carbon stock potential in pastoral and silvopastoral systems in the Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems*, 98, 2157–2167. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00969-w>
- Salgado Veramendi, N., Romero-Chavez, L. E., Huerto Pajuelo, E. S., Ibarra Porras, C. del C., Cunyas-Camayo, J. M., Aldava Pardave, U., Vallejos-Torres, G., & Solórzano Acosta, R. (2025). Carbon storage in coffee agroforestry systems: Role of native and introduced shade trees in the central Peruvian Amazon. *Agriculture*, 15(13), Article 1415. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131415>
- Suárez, J. C., Cruz-Cerón, D. Y., & Andrade, H. J. (2026). Impact of cacao-based agroforestry systems carbon storage in above-ground biomass and necromass in the Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 100, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01381-8>
- Valencia-Manzo, S., & Vargas-Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81–87. <https://www.redalyc.org/pdf/617/61730107.pdf>
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jiménez, N., Pichis-García, R., Ordoñez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Reategui, K., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2024). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1410418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Van Schaik, T., Doraisami, M., & Martin, A. R. (2024). Carbon fractions in wood for estimating embodied carbon in the built environment. *Science of the Total Environment*, 921, Article 171095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171095>
- Wu, C., Yang, Y., & Yue, T. (2024). Review of the current status and development trend of global forest carbon storage research based on bibliometrics. *Forests*, 15(9), Article 1498. <https://doi.org/10.3390/f15091498>

Correspondencia:

Carlos Josue Castre Morales

correo: carlosjosue1102@gmail.com ✉

Wilfredo Tello Zevallos

correo: wilfredo.tello@unas.edu.pe ✉

Tania Elizabeth Guerrero Vejarano

correo: tania.guerrero@unas.edu.pe ✉

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la ejecución, interpretación o publicación de esta investigación.

Contribución del autor:

CJCM (autor principal): conceptualización del estudio, participación en el inventario forestal y selección de los individuos, recolección y procesamiento de las muestras de xilema, determinación de la densidad básica, organización de la base de datos, estimación de la biomasa aérea, carbono aéreo y CO₂ equivalente, análisis e interpretación de los resultados, elaboración de tablas y figuras, redacción del borrador original y revisión final del manuscrito.

WTZ (coautor): asesoramiento metodológico, supervisión del muestreo forestal y de los procedimientos para la determinación de la densidad básica, revisión del análisis estadístico, apoyo en la interpretación de los resultados, revisión crítica del manuscrito y aprobación de la versión final.

TEGV (coautora): asesoramiento y supervisión de la determinación del carbono elemental, revisión de los procedimientos de laboratorio, validación e interpretación de los resultados analíticos, revisión crítica del contenido científico y aprobación de la versión final del manuscrito.

Fuente de Financiamiento:

La investigación no recibió financiamiento económico específico de entidades públicas, privadas ni de organizaciones sin fines de lucro. La Universidad Nacional Agraria de la Selva facilitó el acceso al Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, así como a los laboratorios y equipos utilizados en el procesamiento y análisis de las muestras. Los demás gastos derivados del desarrollo del estudio fueron asumidos por los autores.