

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL**



**CARBONO ELEMENTAL DE TRES ESPECIES FORESTALES DEL BOSQUE
RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA,
TINGO MARÍA**

Tesis

Para optar el grado académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentado por:

CARLOS JOSUE CASTRE MORALES

Tingo María – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO
DIRECCIÓN



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 013-2025-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 07:00 p.m. del jueves 04 de diciembre de 2025, reunidos virtualmente vía Microsoft Teams, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

"CARBONO ELEMENTAL DE TRES ESPECIES FORESTALES DEL BOSQUE RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, TINGO MARÍA"

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental CASTRE MORALES, CARLOS JOSUE.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO** Acto seguido, a horas **09:45 p.m.** el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

Dr. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE
Presidente del Jurado

ING. M.Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
Miembro del Jurado



ING. M.Sc. WARREN RIOS GARCIA
Miembro del Jurado

Dra. TANIA ELIZABETH GUERRERO VEJARANO
Asesor

**UNAS****VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN****INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN****UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 155 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Maestría en Ciencias en Agroecología Mención: Gestión Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CARBONO ELEMENTAL DE TRES ESPECIES FORESTALES DEL BOSQUE RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, TINGO MARÍA	CARLOS JOSUE CASTRE MORALES	11 % Once	Menor a 20 %

Tingo María, 22 de mayo de 2026.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL



**CARBONO ELEMENTAL DE TRES ESPECIES FORESTALES DEL BOSQUE
RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA,
TINGO MARÍA**

Autor (es)	: Carlos Josue Castre Morales
Asesor(es)	: Mg. Wilfredo Tello Zevallos Dr. Tania Elizabeth Guerrero Vejarano
Área de investigación	: Gestión ambiental-PICSDS
Grupo de investigación	: Gestión ambiental
Línea de investigación	: Gestión de la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Fitoquímica Forestal de la EPIF
Duración del trabajo	: 18 meses
Financiamiento	: FEDU (No) Propio (Sí) Otros (No)
Presupuesto	: S/. 4279,00

Tingo María – Perú

2025

DEDICATORIA

*A Dios, que es parte de
mi vida dándome la fuerza valentía y
perseverancia siempre presente en
todo momento de mi vida.*

*A Mi madre Rufina
Morales aponte y Liz Magali Castre
Morales quienes desde inician
estado a mi lado apoyándome en
cada paso de mi carrera académica*

*A mí incondicional amigo
cuya compañía y alegría iluminaron
cada momento de mi vida Gracias por
los instantes compartidos por tu lealtad
inquebrantable y por haber estado a mi
lado durante toda la ejecución.*

AGRADECIMIENTOS

- A Dios que ilumina mi camino con sabiduría y fortaleza guiándome en cada paso de mi vida permitiéndome alcanzar cada meta propuesta.
- A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal por contribuir profesional compartiendo con géneros y da sus conocimientos y experiencias y valores que han fortalecido mi crecimiento académico y personal a la doctora Tania Bejarano mis asesores por su valiosa orientación cuyos consejos y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.
- A mis jurados por sus recomendaciones en mi trabajo de investigación, a mis compañeros de la ATFFS Huánuco por su valiosa orientación.

Índice

I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1. Marco teórico	13
2.1.1. Biomasa	13
2.1.2. Dióxido de carbono.....	13
2.1.3. Calentamiento global.....	14
2.1.4. Gases de efecto invernadero	14
2.1.5. Efecto invernadero	15
2.1.6. Generalidades de las especies en estudio.....	15
2.2. Estado del arte.....	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Lugar de ejecución del trabajo de investigación.....	23
3.2. Materiales y métodos	24
3.2.1. Metodología.....	24
3.2.1.1. Densidad básica de tres especies forestales	24
3.2.1.2. Evaluación del contenido de carbono elemental.....	27
3.2.1.3. Estimación de la biomasa y dióxido de carbono secuestrado	27
3.2.1.4. Variables en estudio.....	28
3.2.1.5. Análisis estadístico	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1. Densidad básica de tres especies forestales	30
4.2. Contenido de carbono elemental.....	31
4.3. Biomasa y dióxido de carbono.....	33
V. CONCLUSIONES.....	37
VI. PROPUESTAS A FUTURO	38
VII. REFERENCIAS	39
ANEXO	46

Índice de Tablas

Tabla	Página
1. Especies seleccionadas del inventario por muestreo en el BRUNAS	16
2. Análisis de varianza.....	20
3. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto a la densidad básica.....	21
4. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto al carbono elemental	23
5. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto a la biomasa.....	25
6. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto al dióxido de carbono.....	27
7. Análisis de varianza (ANVA) para la densidad básica	38
8. Análisis de varianza (ANVA) para el carbono elemental	38
9. Resultados de laboratorio del carbono elemental por especie.....	42
10. Certificado de la identificación de las especies en estudio.....	43
11. Abundancia de especies arbóreas registradas en el BRUNAS	45

Índice de Figuras

Figura	Página
1. Ubicación del área de estudio.....	14
2. Medición del DAP de un árbol.....	39
3. Extracción de una muestra de un cilindro de madera de un árbol.....	40
4. Medición de la longitud de la muestra de cilindro	40
5. Muestra de cilindros de madera en proceso de secado en horno.....	41
6. Pesaje de una muestra seca en estufa usando una balanza analítica.....	41
7. Mapa de distribución de las parcelas de muestreo	44

Resumen

El presente estudio tuvo como finalidad analizar el contenido de carbono elemental en tres especies forestales presentes en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional agraria de la selva (BRUNAS): *Casearia ulmifolia*, *Hevea guianensis* y *Jacaranda copaia*. Para ellos extranjeros muestras de xilema de 33 individuos arbóreos correspondientes a 11 árboles por especie obteniéndose un total de 66 cilindros de madera. La densidad básica se determinó mediante el método gravimétrico mientras que el carbono elemental fue cuantificado utilizando un analizador elemental orgánico. Asimismo, la biomasa aérea se estimó a partir de modelos alométricos que incorporaron variables como el diámetro del árbol, la altura total y la densidad de la madera. Posteriormente el secuestro de CO₂ se calculó considerando la relación estequiométrica existente entre el carbono y el dióxido de carbono. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre las especies evaluadas. *Hevea guianensis* presentó la mayor densidad básica ($0,560 \pm 0,008$ g/cm³), seguida de *Casearia ulmifolia* ($0,532 \pm 0,007$ g/cm³) mientras que *Jacaranda copaia* registró el menor valor ($0,304 \pm 0,011$ g/cm³). En relación con el carbono elemental, los promedios oscilaron entre 45,6% y 47,2%. Respecto a la acumulación de CO₂, *Hevea guianensis* se alcanzó los valores más altos con hasta $670,9 \pm 30,8$ kg por árbol en individuos con diámetros entre 50 y 60 cm. Por su parte la *Jacaranda copaia* obtuvo hasta $265,7 \pm 20,7$ kg y la *Casearia ulmifolia* registró $185,5 \pm 53,5$ kg en clases diamétricas menores. En conclusión, las especies estudiadas mostraron capacidades diferenciadas para el almacenamiento de carbono, resaltando la importancia de utilizar valores específicos de densidad y fracción de carbono para incrementar la precisión de los programas orientados a la mitigación del cambio climático y a las estrategias de reforestación.

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

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 – acronym in Spanish): *Casearia ulmifolia*, *Hevea guianensis* and *Jacaranda copaia*. To do so, xylem samples were collected from thirty three trees (eleven specimens per specie, totaling sixty six wood cylinders) and the basic density was determined using the gravimetric method. The elemental carbon content was evaluated using an organic element analyzer, while the aerial biomass was estimated by applying allometric models that considered the diameter, total height and density of the wood; the CO₂ capture was calculated using the stoichiometric relationship between the carbon dioxide and the carbon. The results showed significant differences between the species: the basic density was greatest in *H. guianensis* (0.560 ± 0.008 g/cm³) and *C. ulmifolia* (0.532 ± 0.007 g/cm³), in comparison to *J. copaia* (0.304 ± 0.011 g/cm³). The average elemental carbon content was between 45.6% and 47.2%, by specie. With respect to the CO₂, *H. guianensis* presented the greatest accumulation, reaching 670.9 ± 30.8 kg per tree for diameters of 50–60 cm, followed by *J. copaia* with values of up to 265.7 ± 20.7 kg and *C. ulmifolia* reached 185.5 ± 53.5 kg for lower diameter classes. It was concluded that the species that were evaluated presented a differentiated potential for storing carbon, which evidenced the need to use specific density value and carbon fractions, with the goal of improving the precision of climate mitigation programs and reforestation policies.

Keywords: basic density of wood, carbon content, aerial biomass, CO₂ capture, tropical forest species

I. INTRODUCCIÓN

En la Amazonía peruana, los bosques naturales representan un componente esencial para la regulación del clima gracias a su capacidad de almacenar carbono en la biomasa aérea y subterránea. Sin embargo, pese a esta importancia, aún persisten vacíos de información acerca del potencial real en referencia a diversas especies nativas, particularmente en áreas de conservación manejadas con fines de investigación, como el bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) en Tingo María. Este ecosistema, a pesar de su relativa protección, se encuentra influenciado por dinámicas naturales y antrópicas que provocan cambios en la estructura de la vegetación, lo que potencialmente afecta los niveles de carbono acumulado en los árboles.

La limitada disponibilidad de información específica sobre el carbono elemental en especies forestales nativas genera una subestimación de contribución en los programas de mitigación climática el manejo forestal sostenible y los mecanismos de compensación de emisiones en este contexto especies como la *Casearia ulmifolia* Vahl ex Vent., *Hevea guianensis* Aubl. y *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don, frecuentes en la región y con distintas características culturales aún no cuentan con investigaciones recientes que permitan cuantificar con precisión su capacidad de almacenamiento de carbono. Esta carencia de información restringe la toma de decisiones relacionadas con el manejo de los bosques, la formulación de proyectos REDD+ y el diseño de políticas de conservación sustentadas en evidencias científicas generada a nivel local

El principal problema identificado es la ausencia de información cuantitativa y la comparativa acerca del contenido de carbono elemental almacenado en la biomasa de 3 especies forestales representativas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la selva (BRUNAS). Aunque los bosques amazónicos son reconocidos ampliamente por su función como sumideros de carbono todavía existe una limitada disponibilidad de estudios que explica en las variaciones en la concentración de carbono entre especies con diferentes características morfológicas, fisiológicas y ecológicas. Esta falta de información dificulta una evaluación precisa del potencial de captura de carbono presente en el bosque reservado y, por ende, limita el desarrollo de estrategias adecuadas para el manejo forestal y la construcción de ecosistemas.

Asimismo, la ausencia de información específica sobre el contenido de carbono elemental en *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* restringe la posibilidad de realizar comparaciones con otras especies forestales o ecosistemas, lo que dificulta la definición de propiedades orientadas a la conservación y al manejo sostenible. La inexistencia de estudios locales genera dependencia de factores de conversión generalizados o de investigaciones realizadas en contextos ecológicos distintos, lo que podría conducir a errores en la

cuantificación del carbono almacenado y dióxido de carbono secuestrado. Por tanto, es necesario determinar empíricamente el contenido de carbono elemental de estas especies mediante métodos analíticos confiables que permitan caracterizar con precisión su aporte al almacenamiento de carbono en el BRUNAS, en tal sentido, al existir estudios escasos respecto al contenido del carbono elemental se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuánto será el contenido de carbono elemental de cada una de las tres especies (*C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*) procedentes del BRUNAS?.

El estudio del carbono elemental en especies forestales nativas es fundamental para comprender el rol que desempeñan en la mitigación del cambio climático. La Amazonía peruana alberga una alta diversidad de especies arbóreas, pero solo una fracción de ellas ha sido evaluada en términos de su capacidad de almacenar carbono. La presente investigación contribuye a disminuir esta brecha de conocimiento, mediante la generación de información científica específica sobre *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*, especies abundantes en el bosque reservado de la UNAS y representativas de su estructura forestal.

Desde el enfoque ambiental esta investigación permitirá fortalecer las estrategias de conservación y manejo sostenible del bosque reservado debido a que el conocimiento del contenido de carbono en estas especies facilitará la elaboración de planes de manejo sustentados en su importancia ecosistémica. Del mismo modo, los resultados obtenidos podrán servir como base para el desarrollo de proyectos vinculados a la captura de carbono y programas de compensación de emisiones, donde la precisión en la estimación del carbono constituye un aspecto fundamental.

En el ámbito académico y científico, la recolección de datos locales actualizados contribuye a enriquecer la literatura sobre ecología forestal amazónica y abre oportunidades para futuras investigaciones comparativas entre especies, bosques o regiones. Finalmente, esta investigación beneficia a la propia universidad al fortalecer su rol como centro de investigación y conservación, proporcionando información importante y para la formación profesional de estudiantes en ciencias forestales y ambientales.

La información obtenida en este trabajo constituirá una base científica y técnica de utilidad para instituciones y centros de investigación vinculados al ámbito energético. Del mismo modo.

En virtud de lo mencionado líneas arriba se plantea los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

- ❖ Analizar el contenido de carbono elemental de tres especies forestales del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)

1.1.1. Objetivos específicos

- ❖ Determinar la densidad básica de la madera de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* del BRUNAS.
- ❖ Evaluar el contenido de carbono elemental de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* del BRUNAS.
- ❖ Estimar la cantidad de biomasa y dióxido de carbono secuestrado *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* del BRUNAS.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Biomasa

La biomasa se entiende como la cantidad total de materia orgánica proveniente de los organismos presentes en un área específica, generalmente se mide en peso por unidad de superficie o volumen (Martínez, 2014; Romanelli et al., 2017). Su composición está constituida principalmente por carbono (50%), oxígeno (43%) e hidrógeno (6%), además de pequeñas proporciones de elementos como nitrógeno, azufre y más. Estos componentes se incluyen estructurados en macromoléculas biológicas, entre las que destacan la celulosa, hemicelulosa, lignina, lípidos, proteínas, azúcares simples, almidón y distintos carbohidratos (Romanelli et al., 2017).

2.1.2. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro, de alta densidad y con baja reactividad química. Se encuentra en la tropósfera con una acumulación alrededor de 350 ppm, y su dinámica natural está estrechamente relacionada con el ciclo del oxígeno (Raynaud et al., 1993).

El carbono (C) constituye uno de los elementos más abundantes en todos los seres vivos (Hessen et al., 2004; Dietze et al., 2014). Durante la fotosíntesis, las plantas incorporan C del CO_2 para formar compuestos biológicos que sostienen las funciones metabólicas y la construcción de estructuras fundamentales (Dietze et al., 2014; Martínez-Vilalta et al., 2016).

Este mecanismo genera una gran reserva de carbono orgánico en la vegetación terrestre (Schlesinger y Bernhardt, 2013), la cual generalmente se calcula multiplicando la biomasa total de la planta por un factor de conversión que refleja su contenido de C (Bert y Danjon, 2006; Thomas y Martín, 2012).

2.1.2.1. Ciclo del carbono

El CO_2 forma parte de un ciclo biogeoquímico que regula el intercambio de carbono entre la atmósfera, los océanos y los reservorios terrestres, posibilitando la reutilización

de los átomos de carbono y asegurando la vida. Así, el carbono presente en el metano (CH_4) y en el CO_2 atmosférico es asimilado por las plantas mediante la fotosíntesis y, a su vez, se disuelve en el agua de lluvia que alcanza los océanos, generando pequeñas cantidades de ácido carbónico. En este ciclo, los procesos de respiración y descomposición microbiana devuelven CO_2 gaseoso a la atmósfera (Raynaud et al., 1993).

2.1.3. Calentamiento global

El calentamiento global se comprende como el incremento sostenido de la temperatura media del planeta, originado por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales dificultan la liberación de la radiación solar desde la superficie terrestre hacia el espacio. Este proceso se manifiesta también en el aumento de la temperatura de los océanos y de la atmósfera en las últimas décadas (Benavides y León, 2007).

El incremento de la temperatura global observado desde mediados del siglo XX está estrechamente vinculado al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano. No obstante, factores naturales como las variaciones en el ciclo solar y las erupciones volcánicas influyeron de manera importante en el calentamiento global desde la era preindustrial hasta aproximadamente 1950 (Power, 2009).

2.1.4. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes atmosféricos que participan en el fenómeno del efecto invernadero y pueden tener tanto un origen natural como antropogénico. La liberación constante de estos gases intensifica el calentamiento terrestre, ya que retienen más radiación de la que logran liberar hacia la superficie del planeta (CEPSA, 2015).

Entre los principales gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera se encuentran el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), los clorofluorocarbonos (CFC), el óxido nitroso (N_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). De ellos, los tres últimos son considerados los más relevantes, ya que, aunque en conjunto representan menos del 1% de la composición atmosférica, este reducido porcentaje es suficiente para generar un efecto invernadero natural capaz de mantener la temperatura del planeta aproximadamente $30\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de lo que sería en su ausencia (Mendoza de Armas y Jiménez, 2017).

2.1.5. Efecto invernadero

Caballero et al. (2007) señalan que el efecto invernadero corresponde a un proceso mediante el cual la atmósfera terrestre se calienta. Este fenómeno ha estado presente desde la existencia del agua en estado líquido en el planeta (Raynal-Villaseñor, 2011) y se fundamenta en principios científicos ampliamente comprobados. La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera tiene un impacto directo en la temperatura global: un aumento de estos gases conduce a un incremento térmico, mientras que una reducción favorece el descenso de las temperaturas (FAO, 1995).

El efecto invernadero se produce debido a que la energía solar que alcanza la Tierra está compuesta por ondas de alta frecuencia que atraviesan la atmósfera, mientras que la energía que el planeta reemite hacia el espacio corresponde a ondas de menor frecuencia. Este proceso ocasiona que parte de la radiación recibida sea liberada de manera más lenta y permanezca por más tiempo en las cercanías de la superficie, lo que genera un aumento de la temperatura (Espíndola y Valderrama, 2012).

2.1.6. Generalidades de las especies en estudio

2.1.6.1. *Casearia ulmifolia*

a. Descripción taxonómica

La clasificación taxonómica según el Angiosperm Phylogeny Group (APG IV, 2017) es la siguiente:

Reino	: Plantae
Filo	: Tracheophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Malpighiales
Familia	: Salicaceae
Género	: Casearia
Especie	: <i>Casearia ulmifolia</i> Vahl ex Vent.

b. Descripción dendrológica

Es un árbol que se desarrolla entre 2 y 30 m de altura y tiene yemas cubiertas de pubescencia. Sus hojas miden de 8 a 14 cm de largo por 3 a 5,5 cm de ancho, con una textura que varía de cartácea a subcoriácea; el limbo es oblongo a elíptico, con base aguda o redondeada, en ocasiones algo atenuada, y un ápice cuspidado-acuminado cuyo acumen alcanza entre 1,5 y 2 cm. Posee de 5 a 7 pares de nervaduras secundarias. Las inflorescencias pueden ser sésiles o con pedúnculos cortos. Los frutos corresponden a cápsulas de 3 a 5,5 mm de largo que albergan de 1 a 4 semillas de tonalidad parda a pardo-anaranjada (Steyermark et al., 1999; Zmarzty, 2007; Peñuela et al., 2010).

c. Distribución y habitat

Se extiende desde Venezuela hasta Perú, encontrándose en zonas como Amazonas, Madre de Dios, Loreto, Pasco, Puno, San Martín, Huánuco y Ucayali. Se ha documentado en sitios como el Bosque Alexander Von Humboldt y Campo Verde (Gentry 36259, 36196; Chávez 71, 382) (Flores, 2018). Esta especie suele ubicarse principalmente en los márgenes de los bosques, así como en etapas sucesionales intermedias y maduras (ICN, 2004).

2.1.6.2. *Jacaranda copaia*

a. Descripción taxonómica

La clasificación taxonómica según el Angiosperm Phylogeny Group (APG IV, 2017) es la siguiente:

Reino	: Plantae
Filo	: Tracheophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Lamiales
Familia	: Bignonaceae
Género	: <i>Jacaranda</i> Juss.
Especie	: <i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don

b. Descripción dendrológica

Este árbol alcanza entre 12 y 30 m de altura, con diámetros que varían de 25 a 90 cm. Presenta una copa ubicada en el tercio superior, sostenida por un tronco cilíndrico de base recta. La corteza externa es grisácea y presenta fisuras de 1 a 3 cm, mientras que la interna es blanquecina y se torna rápidamente marrón al oxidarse. Las ramas terminales, de sección circular y 8 a 15 mm de grosor, son marrón amarillento en estado seco, con numerosas lenticelas y sin pubescencia. Sus hojas son compuestas, bipinnadas y opuestas, con pecíolos de 30 a 45 cm y entre 5 y 20 pinnas por hoja. Cada pinna porta folíolos asimétricos de 1,5 a 7 cm de largo y 0,8 a 2,5 cm de ancho, con margen entero, ápice agudo y base desigual. Las inflorescencias se disponen en panículas terminales multifloras, con flores hermafroditas de corola morada y forma campanulada, que miden entre 3 y 5 cm de longitud. El fruto corresponde a una cápsula oblongoide y aplanada, de 2 a 12 cm de largo por 3 a 6 cm de ancho, con superficie marcada por lenticelas. Sus semillas son aladas, suborbiculares, de 1 a 2 cm de largo y hasta 2,8 cm de ancho, con alas membranosas (Reynel et al., 2003).

c. Distribución y habitat

Esta especie tiene amplia distribución en bosques húmedos de tierras bajas, desde Belice en Centroamérica hasta Bolivia en Sudamérica, habitando principalmente altitudes inferiores a 1000 msnm. Se desarrolla en áreas con precipitaciones elevadas y constantes; es una planta heliófita de rápido crecimiento, común en bosques secundarios pioneros, y muestra preferencia por suelos bien drenados, con textura que va de limosa a arenosa, diferentes niveles de fertilidad y generalmente baja presencia de piedras (Reynel et al., 2003).

d. Usos

La madera es extremadamente blanda y ligera, con grano recto y textura media, de tonalidad blanquecina. En forma local se emplea para carpintería ligera y, en ciertas regiones de la Amazonía peruana, se utiliza para la fabricación de tejas, las cuales presentan una durabilidad adecuada (Reynel et al., 2003).

2.1.6.3. *Hevea guianensis*

a. Descripción taxonómica

La clasificación taxonómica según el Angiosperm Phylogeny Group (APG IV, 2017) es la siguiente:

Reino	: Plantae
Filo	: Tracheophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Malpighiales
Familia	: Euphorbiaceae
Género	: <i>Hevea</i>
Especie	: <i>Hevea guianensis</i> Aubl.

b. Descripción dendrológica

Este árbol puede alcanzar alturas de 18 a 30 m, con un tronco cilíndrico de 30 a 70 cm de diámetro y raíces tablares que no exceden los 0,5 m. La corteza externa varía de marrón claro a grisácea, presenta grietas separadas entre 1 y 3 cm y lenticelas de 2 a 4 mm de diámetro. La corteza interna es amarillenta a rosada y, al cortarse, exuda un látex blanco o crema de flujo rápido y pegajoso. Las ramitas son lisas, de color marrón claro, con un diámetro de 4 a 10 mm. Sus hojas son trifolioladas, alternas, miden entre 15 y 30 cm de largo y se disponen en espiral hacia el extremo de las ramitas. Cada foliolo tiene entre 7 y 15 cm de longitud y 2,5 a 6,5 cm de ancho, con 14 a 20 pares de nervios secundarios paralelos. Las inflorescencias son panículas de 4 a 16 cm de largo, con flores unisexuales de color crema. Los frutos son cápsulas de 4 a 5 cm de largo y hasta 5 cm de ancho, sostenidas por pedúnculos de 6 a 12 cm (Reynel et al., 2003).

c. Distribución y habitat

Se extiende en la región amazónica, desde las Guayanas y Brasil hasta Perú, Ecuador y Colombia, principalmente por debajo de los 700 msnm. Este árbol se desarrolla en

áreas con alta y constante precipitación, pero también puede encontrarse en zonas con una estación seca. Es una especie típicamente esciófita, presente en bosques primarios y secundarios maduros, con preferencia por suelos bien drenados cuya textura, acidez y fertilidad presentan variaciones (Reynel et al., 2003).

d. Usos

El látex se utiliza de manera local para la impermeabilización de ponchos y otras vestimentas, aunque su calidad y durabilidad son inferiores a las del látex de *H. brasiliensis* (Reynel et al., 2003).

2.2. Estado del arte

Existen diversos estudios respecto al contenido elemental de carbono (C) en varias especies vegetales, sin embargo, no hay estudios realizados para las especies en materia de estudio del presente trabajo. Algunos estudios relevantes se citan a continuación:

Doraisami et al. (2025) cuantificaron por primera vez la fracción de carbono volátil (VCF) en madera muerta, a partir de 400 muestras de 13 especies en un bosque templado de Canadá. Los resultados mostraron que la VCF promedio fue $0,89 \pm 0,14\%$, con un rango de $-13,04\%$ a $15,68\%$, significativamente menor que en madera viva ($2,19 \pm 0,18\%$). La VCF fue mayor en madera de tallo ($1,06\%$) que en corteza ($0,64\%$), y alcanzó su máximo en la clase de descomposición inicial ($1,73\%$) para luego descender hasta valores cercanos a cero en estadios avanzados. Ignorar la VCF podría sobrestimar los stocks de carbono en madera muerta en aproximadamente $0,9\%$, lo que representa un error global de hasta 650 Tg C .

Peng et al. (2025) evaluaron el almacenamiento de carbono pirogénico (PyC) y carbono orgánico biológico (BOC) en bosques templado-fríos de coníferas, 13 años después de un incendio severo en las montañas Khingan (China). El PyC en residuos leñosos fue bajo ($0,040\text{--}0,179 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), mientras que en la capa de carbón alcanzó $7,9\text{--}44,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, representando más del 99% del PyC aéreo. El BOC en residuos leñosos varió entre $3,1$ y $16,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, y en la capa de carbón entre $3,8$ y $11,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. El análisis elemental indicó que el PyC de la capa

de carbón tiene una vida media de 100–1000 años, funcionando como sumidero estable de carbono a mediano y largo plazo.

El estudio de Van Schaik et al. (2024) demuestran que las fracciones de carbono (CF) en la madera varían significativamente de los supuestos utilizados en la contabilidad de carbono. Mientras que los modelos suelen asumir un 50%, el análisis de madera procesada reveló un promedio de 51,7 %, superior al valor global de 47,3 % en madera viva. Además, la fracción volátil registrada en la madera aserrada fue de 1,32 %, valor inferior al observado en árboles vivos (1,96 %), aunque no nulo, lo que evidencia una retención parcial de compuestos volátiles después del proceso de secado industrial. Estos resultados permiten corregir las subestimaciones sistemáticas relacionadas con el carbono almacenado en estructuras elaboradas con madera.

Según Doraisami et al. (2024), se realizó una revisión crítica sobre el uso de las fracciones de carbono en madera para la estimación del carbono forestal. Tradicionalmente, las evaluaciones han empleado un valor genérico de 50%; sin embargo, estudios recientes evidencian variaciones importantes dependiendo del bioma y del grupo taxonómico. En este sentido, los angiospermos tropicales presentan una fracción promedio de carbono de 45,6% mientras que las coníferas de zonas templadas alcanzan aproximadamente 50,1% esas diferencias pueden generar errores significativos en las estimaciones de carbono.

Según Ibargüen-Restrepo et al. (2023) evaluaron la fracción de carbono (Fc) de especies forestales en tres bosques del departamento del Chocó, Colombia (Quibdó, Unión Panamericana y Unguía). Se establecieron seis parcelas permanentes de 1 ha, en las que se registraron 2841 individuos pertenecientes a 260 especies, 207 géneros y 99 familias. La Fc promedio obtenida fue de 0,46 g/cm³, con un rango entre 0,43 y 0,48. En Pacurita y Salero se observó mayor diversidad florística, mientras que en Unguía predominó *Prioria copaifera* (IVI = 202,6). Entre las especies con mayor peso ecológico se destacaron *Perkia pendula*, *Chrysophyllum argenteum* y *Eschweilera integrifolia*.

Doraisami et al. (2022) describen la mayor base de datos global de concentraciones de carbono (Global Woody Tissue Carbon Concentration Database (GLOWCAD)) en tejidos leñosos, con 3.676 registros de 864 especies de árboles y arbustos recolectados entre 1980 y

2020. Los valores de concentración de C oscilaron entre 18,4% y 75,1% de la masa seca, evidenciando una alta variabilidad entre biomas y tipos de tejido. El 73% de los datos provienen de tejidos vivos y el 27% de madera muerta. El estudio demuestra que usar un valor genérico de 50% sobrestima los stocks de carbono hasta en 8,9% en bosques tropicales y en $\sim 3,0$ Pg C a nivel global en madera muerta, resaltando la importancia de aplicar fracciones específicas.

Paroshy et al. (2021) analizaron 1.145 observaciones geo-referenciadas de 415 especies de árboles para evaluar cómo el clima influye en la concentración de carbono en la madera. Los resultados mostraron que las concentraciones de C oscilaron entre 30,5% y 65,0%, con un valor medio de 47,7%, menor al valor estándar del 50% usado en inventarios forestales. La temperatura media anual (MAT) fue el predictor más fuerte: un aumento de 1 °C redujo en promedio la concentración de C en 0,11%. Este efecto fue más marcado en corteza, ramillas y raíces finas (hasta $-0,39\%/^{\circ}\text{C}$), sugiriendo que la temperatura regula la composición química de la madera

El estudio de Martin et al. (2021) analizaron 973 observaciones de fracciones de carbono (CF) en madera muerta de 121 especies, cubriendo todos los biomas forestales. Se encontró que la CF promedio es $48,5 \pm 0,8\%$, menor que el 50% comúnmente asumido, generando sobreestimaciones de carbono de hasta 3,0 Pg en bosques tropicales. Las variaciones fueron significativas entre biomas (boreal 48,8 %, templado 49,3 %, tropical 47,2%, subtropical/mediterráneo 46,2%), divisiones taxonómicas (gimnospermas 49,2%, angiospermas 47,2%), tipos de tejido (rama 45,7%, corteza 48,7%), y clases de descomposición (47,5–48,7%). Estos resultados corrigen errores sistemáticos en los cálculos globales de carbono.

Según Aldave y Aponte (2019) compararon 15 especies vegetales vasculares en cuanto a su contenido porcentual de carbono, recolectando muestras completas de tallo, raíz y hojas según correspondiera a cada especie. El porcentaje de carbono (%C) se analizó clasificando las plantas en tres grupos: a) suculentas, b) acuáticas flotantes y c) hierbas anfibias. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los %C de las suculentas ($33,77 \pm 7,05\%$), las acuáticas flotantes ($39,25 \pm 11,76\%$) y las hierbas anfibias ($48,97 \pm 9,32\%$).

Beets & Garrett (2018) evaluaron las fracciones de carbono (CF) en componentes de biomasa de *Pinus radiata* en 14 sitios de Nueva Zelanda. Los resultados mostraron que la CF promedio fue 0,498 g C g⁻¹dm en madera del fuste, 0,514 en acículas, 0,507 en ramas, 0,519 en conos, 0,501 en raíces y 0,539 en corteza. La corteza fue el único componente con variación significativa por edad, aumentando de 0,508 a 0,554 g C g⁻¹dm entre los 5 y 28 años. El uso de la fracción por defecto (0,50) subestima el carbono almacenado en los bosques de Nueva Zelanda en aproximadamente 1 %, afectando los cálculos de inventarios y remociones de carbono.

Ma et al. (2018) en un estudio realizaron un análisis global del contenido de C de la planta sintetizando datos de 4318 especies para documentar valores específicos y su variación del contenido de C en los órganos de las plantas y las formas de vida. El contenido de C según el órgano de la planta osciló entre el 45,0% en los órganos reproductivos y el 47,9% en los tallos a escala global, lo que fue significativamente inferior al valor canónico ampliamente utilizado del 50%. El contenido de C de la planta en las hojas (media global de 46,9%) fue mayor que en las raíces (45,6%). En todas las formas de vida, las plantas leñosas exhibieron un mayor contenido de C que las plantas herbáceas. Las coníferas, en relación con las especies leñosas de hoja ancha, tuvieron un mayor contenido de C en raíces, hojas y tallos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución del trabajo de investigación

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Fitoquímica Forestal de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Las muestras de madera (xilema) se obtuvieron del Bosque Reservado de la misma universidad (Figura 1).

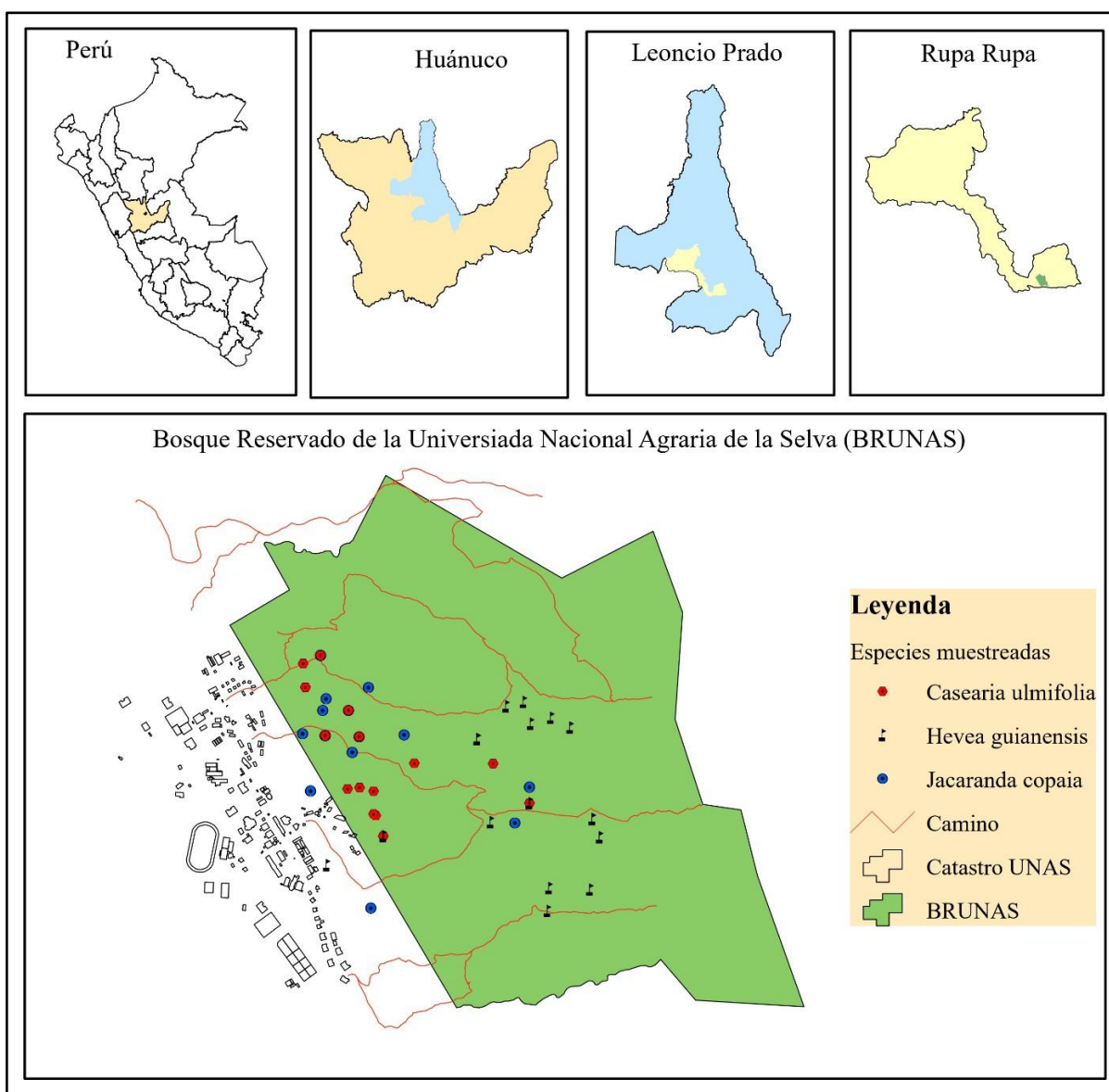


Figura 1. Ubicación del área de estudio

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Metodología

3.2.1.1. Densidad básica de tres especies forestales

a. Inventario por muestreo

El inventario por muestreo se realizó en el BRUNAS. El tamaño de muestra fue calculado con la siguiente fórmula (MINAM, 2014).

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{(N - 1)E^2 + (Z^2 * p * q)} \dots\dots\dots (1)$$

Dónde:

Z : Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel de probabilidad del 95% (1,96)

n : Tamaño de muestra

p : Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (50%)

q : Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado ($q = 1 - p$) (50%)

N : Tamaño de la población (21722 parcelas)

E : Error de muestreo (10%)

La unidad de medición fue un área de 100 m² (10x10 metros), en las que se registraron árboles con un diámetro a la altura del pecho (D.A.P.) igual o superior a 10 cm. Con base en la Ecuación 1 y los parámetros establecidos.

b. Tamaño de muestra

El inventario se llevó a cabo mediante un muestreo sistemático en el área del BRUNAS. La muestra fue 96 parcelas (**Figura 7**) los cuales se distribuyeron a lo largo y ancho

de dicha área, garantizando que cada unidad de medición (parcela 10x10 m) estuviera ubicada en una zona con cobertura de vegetación arbórea.

Seguidamente, basado en los datos del inventario por muestreo se realizó el respectivo análisis, del cual se definió tres especies representativas que forman parte el top 6 en función a su abundancia (**Tabla 11**). Estas tres especies se detallan en la **Tabla 1**. Se recolectaron muestras de madera (cilindros) de 11 individuos (en concordancia con la Norma Técnica Peruana (NTP) 251.008.) por cada especie, totalizando 33 árboles, de los cuales se obtuvieron 2 cilindros por árbol (madera de tracción y madera normal), sumando un total de 66 cilindros. Es importante mencionar que el proceso de identificación taxonómica de las especies (**Tabla 10**) se realizó en la fase de inventario por muestreo.

Tabla 1. Especies seleccionadas del inventario por muestreo del BRUNAS

Nº	Especie
1	<i>Casearia ulmifolia</i> Vahl ex Vent.
2	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don
3	<i>Hevea guianensis</i> Aubl.

c. Medición del DAP

La medición del diámetro a la altura del pecho (1,30 m) se realizó con una cinta diamétrica (**Figura 2**, Anexo).

d. Identificación de la madera de tracción y madera normal

Con el fin de obtener al menos dos muestras de madera por árbol, se definieron la madera de tracción y la madera normal. Para ello, el observador debía ubicarse a una distancia prudente que permitiera visualizar completamente el árbol en pie y determinar la dirección de inclinación del fuste en el plano horizontal, lo cual permitió identificar la madera de tracción y la madera normal (opuesta).

e. Recolección de muestra de xilema

Las muestras de xilema (cilindros) para el análisis de laboratorio fueron recolectadas de tres de las especies forestales ubicadas en el top 6, según el inventario

exploratorio. Las muestras cilíndricas se extrajeron con un barreno de Pressler, introducido de manera perpendicular a una altura de 1,30 m (DAP) del fuste (**Figura 3**, Anexo), considerando la madera de tracción y la madera opuesta (madera normal). El barreno penetró hasta el radio completo del diámetro de la especie. Los cilindros recolectados (**Figura 4**, Anexo) de cada árbol se codificaron con plumón indeleble y se colocaron en sorbetes de plástico, uniéndolos con cinta si excedían su longitud. Los sorbetes se almacenaron en una caja de Tecnopor (Valencia-Manzo y Vargas-Hernández, 1997). Además, una vez obtenidas las muestras de cada árbol, se utilizó un fungicida (Sanix Plus), que se esparció en el orificio dejado por el barreno con un atomizador. Luego, para rellenar completamente el orificio y como segunda medida antifúngica y antibacteriana, se utilizó cera de abeja (Grissino-Mayer, 2003).

f. Determinación de la densidad básica de la madera

La densidad básica se determinó utilizando el método empírico (Valencia-Manzo y Vargas-Hernández, 1997), que consiste en considerar como un cilindro perfecto la muestra obtenida con el barreno de Pressler, el cual tiene un diámetro definido de 5,15 mm. Una vez obtenidas las muestras de madera (cilindros) de la sección transversal (teniendo en cuenta la madera de tracción y la madera normal) y cuando estas presentaron un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra, se midió únicamente el largo (**Figura 4**) de cada cilindro (muestra) utilizando un vernier mecánico (marca Litz). Con los valores de longitud y del diámetro de la muestra (5,15 mm), se obtuvo el volumen (Ecuación 2) de cada una de las muestras recolectadas.

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

Donde:

V_v : Volumen del húmedo cilindro (cm³)

D : Diámetro del cilindro (mm)

L : Longitud del cilindro (mm)

La masa anhidra (P_o) de las muestras se obtuvo utilizando una balanza analítica (**Figura 6**) (marca Ohaus) después de deshidratarlas en la estufa a 105 ± 3 °C (**Figura 5**) hasta

alcanzar peso constante. Asimismo, con los datos de masa anhidra y volumen húmedo se obtuvo el valor de densidad básica (Ecuación 3) de la madera.

$$Db = Po/Vv \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

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

Po : Masa anhidra de la muestra (g)

Vv : Volumen húmedo del cilindro (cm³)

3.2.1.2. Evaluación del contenido de carbono elemental

La composición elemental (fracción de carbono) de las muestras de biomasa (xilema) se determinó mediante un analizador elemental orgánico (ThermoFisher Flashsmart) (**Tabla 9**). Para el análisis de carbono (C), se colocarán aproximadamente 3 mg de muestra (xilema) en una cápsula de estaño con 8 a 10 mg del auxiliar de combustión (ácido aspártico). Todas las pruebas se realizaron por triplicado. Asimismo, los resultados obtenidos se presentaron en porcentaje en peso (% en peso) (Trombley et al., 2023).

3.2.1.3. Estimación de la biomasa y dióxido de carbono secuestrado

a. Estimación de la biomasa

Para calcular la biomasa se utilizó el modelo alométrico propuesto por Chave y otros (Chave et al., 2014).

$$Ba = 0,0673 * (\delta D^2 H)^{0,976} \dots\dots\dots (3)$$

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)

b. Estimación del secuestro de dióxido de carbono (CO₂)

En principio se realizó la estimación del contenido de carbono aéreo almacenado, para el cual se tomó en cuenta la fracción de carbono (determinada en la sección 3.2.1.2.) en función de cada biomasa por especie. La cantidad de carbono aéreo será calculado con la Ecuación 4.

$$Ca = Ba * Fc \dots\dots\dots (4)$$

Dónde:

Ca : Carbono aéreo (kg/árbol)

Ba : Biomasa arbórea aérea (kg/árbol)

Fc : Fracción de carbono

Para estimar el dióxido de carbono secuestrado de se empleó la Ecuación 5 (Vallejo, 2009; Alegre, 2008; Gamarra, 2001; IPCC; 2003).

$$CO_2 = Ca * \frac{\text{Peso molecular del } CO_2}{\text{Peso atómico del C}} \dots\dots\dots (5)$$

Dónde:

CO₂ : Dióxido de carbono secuestrado (kg/árbol)

Ca : Carbono aéreo (kg/árbol)

3.2.1.4. Variables en estudio

a. Variable independiente:

- Especies forestales (3)

b. Variables dependientes:

- Densidad básica

- Contenido de carbono elemental

- Biomasa y dióxido de carbono

3.2.1.5. Análisis estadístico

Los datos se procesaron utilizando un análisis de varianza (ANVA) de un solo factor. Para evaluar las diferencias entre los promedios, se aplicó la prueba de Duncan con un nivel de significancia de $P < 0,01$. El diseño del análisis de varianza se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Análisis de varianza

Fuente de variación	Grados de libertad
Tratamientos (Especies)	$(j-1) = 2$
Error experimental	$(k-j) = 6$
Total	$(k-1) = 8$

a. Modelo aditivo lineal

$$Y_{jk} = \mu + T_j + E_{jk}$$

Donde:

Y_{ij} : Variable respuesta con el tratamiento j en la repetición k

μ : Media poblacional

T_j : Efecto del i -ésimo tratamiento (tipo de especie)

E_{jk} : Error experimental asociado al tratamiento j la repetición k

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Densidad básica de tres especies forestales

La densidad básica de la madera constituye una de las propiedades físicas más relevantes en los estudios de carbono, debido a que se relaciona directamente con la biomasa y, en consecuencia, con la capacidad de almacenamiento de carbono en las especies forestales (Chave et al., 2005). La Tabla 3 presenta los valores de densidad básica de las tres especies evaluadas: *H. guianensis*, *C. ulmifolia* y *J. copaia*. Los resultados muestran diferencias estadísticas significativas ($P < 0,01$) (Tabla 7). En este sentido, *H. guianensis* registró la mayor densidad básica ($0,560 \pm 0,008$ g/cm³), seguida de *C. ulmifolia* ($0,532 \pm 0,007$ g/cm³), mientras que *J. copaia* presentó el valor más bajo ($0,304 \pm 0,011$ g/cm³). Este patrón evidencia la relevancia de la densidad básica como indicador de la estrategia funcional de las especies y de su potencial para acumular carbono en los tejidos leñosos (Williamson & Wiemann, 2010).

Tabla 3. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto a la densidad básica

Especie	Familia	Densidad básica (g.cm ⁻³) ¹	Duncan ($P < 0,01$) ¹
<i>H. guianensis</i>	Euphorbiaceae	0,560±0,008	a
<i>C. ulmifolia</i>	Salicaceae	0,532±0,007	a
<i>J. copaia</i>	Bignoniaceae	0,304±0,011	b

¹Los valores representan la media±EE (error estándar). Letras diferentes (a-b) indican diferencia estadística significativa para la prueba de Duncan ($P < 0,01$).

La mayor densidad básica observada en *H. guianensis* y *C. ulmifolia* indica una estructura leñosa más compacta, característica de especies con maderas duras, lo cual implica mayor resistencia mecánica y, al mismo tiempo, un mayor contenido de carbono por unidad de volumen (Malhi et al., 2006). Por el contrario, el menor valor en *J. copaia* corresponde a lo que se describe en la literatura como maderas livianas, propias de especies pioneras y de rápido crecimiento, las cuales invierten menos energía en estructuras densas y más en expansión rápida del fuste (Chave et al., 2009). Esta diferencia funcional es clave al considerar la dinámica del carbono en bosques tropicales, dado que las especies de alta densidad contribuyen de manera más estable y duradera al almacenamiento de carbono, mientras que las de baja densidad lo hacen de forma más dinámica y transitoria (Baker et al., 2004a).

Comparando con otros estudios, los valores obtenidos para *H. guianensis* son consistentes con los reportados en la base de datos global de maderas tropicales de Zanne et al. (2009), quienes registran densidades cercanas a $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ para esta especie. De igual forma, *C. ulmifolia* ha sido reportada en rangos de $0,50\text{--}0,54 \text{ g.cm}^{-3}$, lo que coincide con lo encontrado en este estudio (Chave et al., 2006). En el caso de *J. copaia*, su densidad básica alrededor de $0,30 \text{ g.cm}^{-3}$ se ajusta a lo descrito por Nogueira et al. (2007) en la Amazonía brasileña, donde esta especie es considerada de madera blanda y con valores consistentemente bajos. Estas similitudes respaldan la validez de los resultados obtenidos y evidencian la concordancia de las mediciones locales con los registros reportados a nivel internacional.

Desde la perspectiva del carbono elemental, La densidad básica de la madera constituye un factor importante en la estimación de la biomasa y del carbono almacenado tanto a nivel de árbol como de rodal en el presente estudio especies como *H. guianensis* y *C. ulmifolia*, que presentaron mayores valores de densidad muestran una relación más favorable entre el volumen de madera y el carbono acumulado. Por lo que presentan alternativas estratégicas para programas de reforestación forestal y compensación de emisiones de carbono en contraste con la *J. copaia*, pese a registrar una menor densidad posee un crecimiento acelerado que le permite desempeñar un papel relevante en la captura inicial de carbono especialmente durante las primeras etapas de la sucesión forestal. En este sentido la combinación de especies con diferentes densidades de madera puede generar efectos complementarios en la dinámica de almacenamiento de carbono en bosques tropicales intervenidos o en proceso de recuperación.

4.2. Contenido de carbono elemental

El contenido de carbono elemental más elevado correspondió a *C. ulmifolia* (54,6%), valor significativamente mayor ($P < 0,01$) que el observado en *H. guianensis* (47,9 %) y *J. copaia* (46,2%), tal como se aprecia en la **Tabla 4**. Este comportamiento evidencia diferencias interespecíficas estadísticamente significativas en la capacidad de las maderas para almacenar carbono (**Tabla 8**), en concordancia con lo documentado para especies tropicales, cuyos valores suelen oscilar entre 45 y 55% (Thomas & Malczewski, 2007; Thomas & Martin, 2012).

Tabla 4. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto al carbono elemental

Especie	Familia	Carbono (%) ¹	Duncan ($P<0,01$) ¹
<i>C. ulmifolia</i>	Salicaceae	54,6±0,4	a
<i>H. guianensis</i>	Euphorbiaceae	47,9±0,4	b
<i>J. copaia</i>	Bignoniaceae	46,2±0,7	b

¹Los valores representan la media±EE (error estándar). Letras diferentes (a-b) indican diferencia estadística significativa para la prueba de Duncan ($P<0,01$).

El contenido de carbono elemental en la biomasa leñosa es un indicador clave para comprender la capacidad de fijación y almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales, ya que constituye la base para la estimación de stocks y flujos de carbono en programas de mitigación del cambio climático. Químicamente, este parámetro está determinado por la proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en la madera, siendo la lignina la fracción más rica en carbono por unidad de masa (Lamlom & Savidge, 2003). La variación entre especies refleja diferencias anatómicas y químicas propias de cada taxón, así como factores ambientales que influyen en la síntesis de compuestos estructurales (Thomas & Martin, 2012).

El valor de *C. ulmifolia* (54,6 %) se ubica en el rango superior de lo documentado en bosques tropicales. Investigaciones desarrolladas en Costa Rica por Fonseca Et al (2012) reportaron contenidos de carbono que oscilaron entre 44% y 56% en plantaciones de especies nativas. De igual manera Martín y Tomás señalaron que ciertas especies pueden superar ampliamente el valor de referencia de 50%, respaldando la necesidad de evitar el uso de un único factor genérico para las estimaciones de biomasa y carbono. Bajo este contexto, la aplicación generalizada del valor del 50% propuesto por el IPCC 2019 podría generar una subestimación de la capacidad real de almacenamiento de carbono.

Por otro lado, *H. guianensis* y *J. copaia* registraron menores contenidos de carbono elemental, con valores (47,9 % y 46,2%, respectivamente). Estos resultados coinciden con lo reportado por Nogueira et al. (2007) en bosques amazónicos de Brasil, donde especies pertenecientes a las familias Euphorbiaceae y Bignoniaceae presentaron concentraciones promedio entre 45 y 48%. Lo anterior indica que la composición química de estas maderas suele ubicarse por debajo del valor de referencia de 50%, debido a una menor proporción de lignina y una mayor fracción de carbohidratos estructurales oxigenados, los cuales poseen una concentración relativa de carbono más baja (Lamlom & Savidge, 2003).

La diferencia registrada entre *C. ulmifolia* y las otras especies evaluadas tiene implicancias importantes en la estimación de stocks de carbono. De acuerdo con Chave et al. (2005) y Martin y Thomas (2011) el empleo de factores específicos por especie permite mejorar la precisión en los cálculos de biomasa y carbono, aspecto particularmente relevante en programas de reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD+) y en proyectos de restauración forestal con fines orientados a la captura de carbono. En este contexto, considerar a *C. ulmifolia* una fracción de carbono superior al 50% contribuiría a representar con mayor exactitud su aporte en el balance de carbono.

En el ámbito del manejo forestal y restauración ecológica, especies como *C. ulmifolia*, que presentan altos contenidos de carbono elemental, representan alternativas estratégicas para optimizar el almacenamiento de carbono. En contraste, *J. copaia*, pese a registrar menores concentraciones de carbono, pueden compensar esta diferencia gracias a su rápido crecimiento y su capacidad de acumulación de biomasa (Nogueira et al., 2007).

4.3. Biomasa y dióxido de carbono

El contenido de biomasa se incrementa de manera significativa conforme aumenta la clase diamétrica en todas las especies evaluadas, como se aprecia en la **Tabla 5**. *H. guianensis* mostró la mayor amplitud en los valores, alcanzando hasta 1400,6 kg·árbol⁻¹ en la clase de 50–60 cm, con diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,01$). En comparación, *C. ulmifolia* solo registró hasta 250,0±98,0 kg·árbol⁻¹ en la clase de 20–30 cm, mientras que *J. copaia* llegó a 575,6 kg·árbol⁻¹ en la clase de 30–40 cm. La prueba de Duncan respalda la consistencia de estas diferencias entre clases, destacando la influencia del diámetro en la acumulación de biomasa.

La biomasa de madera por árbol se incrementa significativamente a medida que aumenta la clase diamétrica en las tres especies evaluadas: *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*. Este patrón responde a fundamentos geométricos, ya que el volumen del fuste y de los componentes leñosos escala con el cuadrado o cubo del diámetro, de manera que pequeñas variaciones en el DAP generan grandes diferencias en biomasa acumulada (Chave et al., 2014). Esta relación

explica que los individuos de mayor diámetro concentren la mayor parte de la biomasa en el bosque.

Tabla 5. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto a la biomasa

Especie	Clase diamétrica (cm)				
	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
<i>C. ulmifolia</i> ¹	51,2±7,2 ^a	250,0±98,0 ^b			
<i>H. guianensis</i> ¹	45,8±8,8 ^a	196,0±27,2 ^b	470,6±87,3 ^c		1400,6±64,4 ^d
<i>J. copaia</i> ¹		213,7±15,6 ^a	426,7±62,0 ^b	575,6±44,9 ^c	

¹Los valores representan la media±EE de la biomasa (kg. árbol⁻¹) de la madera en función de la clase diamétrica. Letras distintas (a-d) indican diferencia estadística significativa para la densidad básica en la prueba de Duncan ($P<0,01$) para las especies en función de la clase diamétrica.

Las diferencias entre especies se explican en buena medida por la densidad básica de la madera. En este estudio, *H. guianensis* presentó un valor de 0,560 g·cm⁻³, *C. ulmifolia* de 0,532 g·cm⁻³ y *J. copaia* de 0,304 g·cm⁻³ (**Tabla 3**). A igualdad de D. A. P., un árbol con madera más densa acumula más biomasa, lo que justifica los valores superiores de *H. guianensis* en clases diamétricas mayores y los valores intermedios de *J. copaia*, pese a alcanzar diámetros relativamente grandes. La influencia de la densidad de la madera en las estimaciones de biomasa está ampliamente documentada y es considerada un predictor clave en modelos alométricos pantropicales (Chave et al., 2014). Además de la densidad, factores como la arquitectura del árbol, la proporción de fuste y ramas, el grosor de la corteza y la estrategia de crecimiento determinan la biomasa acumulada. Especies de crecimiento lento y maderas densas suelen asignar más recursos a tejidos de soporte, resultando en mayor biomasa por unidad de diámetro, mientras que especies pioneras de rápido crecimiento presentan densidades menores y una asignación distinta entre fuste y ramas (Muller-Landau, 2004). Estas diferencias inter e intraespecíficas explican la variabilidad registrada dentro de las clases (**Tabla 5**). La elección del modelo alométrico también influye en los valores estimados. Ecuaciones que incorporan simultáneamente DAP, altura y densidad de la madera, como las propuestas por Chave et al. (2014), han demostrado reducir sesgos y mejorar la precisión de las estimaciones en especies con arquitecturas contrastantes. En contextos de alta diversidad, como los bosques tropicales, la aplicación de estas fórmulas es fundamental para evitar subestimaciones o sobreestimaciones de la biomasa.

Al comparar con otros trabajos, los patrones hallados son consistentes con estudios pantropicales que destacan el papel del DAP y la densidad de la madera en la predicción de la biomasa (Chave et al., 2014). Asimismo, Poorter et al. (2016) demostraron que los bosques secundarios neotropicales presentan una alta capacidad de recuperación de biomasa, alcanzando hasta el 90 % de la biomasa de bosques maduros en pocas décadas. En ese proceso, especies de baja densidad como *J. copaia* tienden a dominar las etapas tempranas e intermedias, contribuyendo a la rápida acumulación inicial de biomasa, mientras que especies de mayor densidad como *H. guianensis* consolidan la acumulación en fases posteriores, al alcanzar mayores diámetros. Esta dinámica coincide con lo observado en la **Tabla 5**, donde *J. copaia* muestra un incremento gradual en clases intermedias y *H. guianensis* domina claramente en clases superiores.

En el caso de *C. ulmifolia*, su comportamiento variable refleja lo descrito para especies secundarias que se establecen en micrositios heterogéneos y responden de manera menos predecible a las condiciones de competencia y disponibilidad de recursos (Chave et al., 2005; Poorter et al., 2016). La magnitud de los valores obtenidos en *H. guianensis*, superiores a una tonelada por árbol en la clase de 50–60 cm, es consistente con estudios destructivos que han reportado valores similares en especies de madera densa y diámetros superiores a 50 cm (Brown, 1997; Chave et al., 2014). En contraste, los valores de *J. copaia* se sitúan en el rango esperado para especies de madera ligera, lo cual subraya la importancia de incluir la densidad de la madera en las comparaciones interestudio.

El incremento del diámetro se asocia con un aumento significativo en los valores de CO₂ acumulado en *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*, tal como se observa en la **Tabla 6**. En *C. ulmifolia*, los valores variaron entre $27,9 \pm 3,9$ y $185,5 \pm 53,5$ kg·árbol⁻¹, mientras que *H. guianensis* presentó la mayor amplitud, con un rango desde $22 \pm 4,2$ hasta $670,9 \pm 30,8$ kg·árbol⁻¹. Por su parte, *J. copaia* mostró valores intermedios, entre $98,6 \pm 7,2$ y $265,7 \pm 20,7$ kg·árbol⁻¹. La prueba de Duncan reveló diferencias estadísticas significativas ($P < 0,01$) entre las clases diamétricas de cada especie, lo que confirma que el diámetro es un factor determinante en la acumulación de CO₂ y en su potencial de mitigación climática.

La tendencia de la acumulación de carbono y la subsecuente estimación de CO₂ está directamente vinculada a la densidad de la madera y al contenido de carbono elemental. Es

decir, a mayor volumen de biomasa, mayor captura de carbono, lo cual ha sido ampliamente documentado en estudios sobre dinámica de biomasa forestal (Chave et al., 2014). Asimismo, la densidad básica de la madera, reportada previamente para estas especies, influye en la capacidad de fijar carbono; por ejemplo, especies como *C. ulmifolia* presentan valores de densidad relativamente altos que fortalecen su aporte al almacenamiento de carbono (Nogueira et al., 2008).

Tabla 6. Prueba de Duncan para el tipo de especie y familia respecto al dióxido de carbono

Especie	Clase diamétrica (cm)				
	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
<i>C. ulmifolia</i> ¹	27,9±3,9 ^a	185,5±53,5 ^b	---	---	
<i>H. guianensis</i> ¹	22±4,2 ^a	93,9±13,1 ^b	225,5±41,8 ^c	---	670,9±30,8 ^d
<i>J. copaia</i> ¹	---	98,6±7,2 ^a	197±28,6 ^b	265,7±20,7 ^c	

¹Los valores representan la media±EE del dióxido de carbono (kg. árbol⁻¹) de la madera en función de la clase diamétrica. Letras distintas (a-d) indican diferencia estadística significativa para la densidad básica en la prueba de Duncan ($P<0,01$) para las especies en función de la clase diamétrica.

Al comparar con otros estudios, los resultados concuerdan con investigaciones realizadas en bosques tropicales de la Amazonía y Centroamérica, donde se ha encontrado que la captura de carbono aumenta exponencialmente con el diámetro del árbol (Baker et al., 2004b; Rutishauser et al., 2013). En particular, *H. guianensis* se confirma como una especie de alto potencial de almacenamiento en diámetros mayores, lo cual coincide con hallazgos en la Amazonía brasileña que destacan su importancia en programas de mitigación de carbono (Nogueira et al., 2008). Por su parte, *J. copaia*, aunque de densidad más baja, compensa mediante su rápido crecimiento y acumulación de biomasa, patrón observado también en estudios en bosques secundarios neotropicales (Poorter et al., 2016).

V. CONCLUSIONES

- ❖ *H. guianensis* presentó la mayor densidad básica ($0,560 \text{ g/cm}^3$), seguida de *C. ulmifolia* ($0,532 \text{ g/cm}^3$) y *J. copaia* ($0,304 \text{ g/cm}^3$), confirmando diferencias significativas entre especies.
- ❖ El contenido de carbono varió entre especies: *C. ulmifolia* alcanzó 54,6 %, mientras que *H. guianensis* y *J. copaia* registraron 47,9 % y 46,2 % respectivamente.
- ❖ La estimación de biomasa y dióxido de carbono secuestrado evidenció una clara influencia del diámetro y la densidad de la madera. *H. guianensis* alcanzó el mayor potencial de almacenamiento con hasta $1400,6 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ de biomasa y $670,9 \pm 30,8 \text{ kg}$ de CO_2 en la clase diamétrica de 50–60 cm. En contraste, *J. copaia* llegó a $575,6 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ de biomasa y $265,7 \pm 20,7 \text{ kg}$ de CO_2 , mientras que *C. ulmifolia* alcanzó valores de $250 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ de biomasa y $185,5 \pm 53,5 \text{ kg}$ de CO_2 en clases menores

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- ❖ **Variación intraespecífica del contenido de carbono y su relación con factores ambientales en el BRUNAS.** Investigar cómo microvariaciones ambientales (luz, humedad del suelo, pendiente, competencia) influyen en la densidad básica, fracción de carbono y biomasa de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*. Esto permitiría determinar si su potencial de captura de carbono cambia según el hábitat, mejorando la precisión de modelos de mitigación climática.
- ❖ **Dinámica de carbono en biomasa subterránea y necromasa leñosa en el BRUNAS.** Cuantificar el carbono almacenado en raíces finas y gruesas, así como en madera muerta (necromasa) de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia*. Integrar estos reservorios con la biomasa aérea para estimar el balance total de carbono y mejorar los inventarios forestales de la Amazonía peruana.
- ❖ **Dendrocronología y dinámica de carbono en especies nativas del BRUNAS.** Aplicar dendrocronología y análisis elemental en anillos de crecimiento de *C. ulmifolia*, *H. guianensis* y *J. copaia* para estimar edad, tasas de crecimiento histórico y variación temporal del contenido de carbono, relacionándolos con eventos climáticos y disturbios locales.

VII. REFERENCIAS

- Aldave, T., & Aponte, H. (2019). Estudio comparativo del porcentaje de carbono entre especies de flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 26(2), 751-760.
- Alegre, J. (2008). Manejo de Sistemas Agroforestales para la recuperación de los suelos degradados de la Amazonía y generación de servicios medio ambientales. In *XI congreso Nacional y IV Internacional de la Ciencia del Suelo. "Suelos: Agricultura Sustentable, Biodiversidad y Agroforestería para el Desarrollo Rural"*. Tarapoto-Perú (pp. 34-50).
- Angiosperm Phylogeny Group IV [APG IV]. (2017). Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. <https://doi.org/10.15468/fzuaam>
- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., ... & Vasquez Martinez, R. (2004a). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, 10(5), 545–562.
- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., ... & Vásquez Martínez, R. (2004b). Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 353-365.
- Beets, P. N., & Garrett, L. G. (2018). Carbon fraction of *Pinus radiata* biomass components within New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(14), 1–12
- Benavides, H. y León, G. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. Subdirección de Meteorología
- Bert, D., & Danjon, F. (2006). Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *Forest Ecology and Management*, 222(1-3), 279-295.

- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 1-12.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99.
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12(4), 351-366.
- Chave, J., Muller-Landau, H. C., Baker, T. R., Easdale, T. A., Steege, H. T., & Webb, C. O. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological applications*, 16(6), 2356-2367.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Compañía Española de Petróleos (CEPSA) (2015). El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cepsa.
- Dietze, M. C., Sala, A., Carbone, M. S., Czimczik, C. I., Mantooth, J. A., Richardson, A. D., & Vargas, R. (2014). Nonstructural carbon in woody plants. *Annual review of plant biology*, 65, 667-687.
- Doraisami, M., Domke, G. M., & Martin, A. R. (2024). Improving wood carbon fractions for multiscale forest carbon estimation. *Carbon Balance and Management*, 19(25)

- 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(1), 284.
- 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, 122555.
- Espíndola, C. & Valderrama, J. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información Tecnológica*. 23(1), 163-176. DOI: 10.4067/S0718-07642012000100017
- Flores, Y. 2018. Árboles nativos de la Región Ucayali. Estación Experimental Agraria Pucallpa. Pucallpa, Perú. 375 p
- Fonseca, W., Alice, F. E., & Rey-Benayas, J. M. (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197-211.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1995). *Cambio climático, bosques y ordenación forestal*. Roma: FAO.
- Gamarra, R. J. (2001). Estimación del contenido de carbono en plantaciones de Eucaliptus globulus Labill en Junín, Perú. In *Símpoio Internacional de Medición y captura de carbono en ecosistemas forestales del* (pp. 18-21).
- Grissino-Mayer, H.D. (2003). A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Research* 59: 63-79.
- Hessen, D. O., Ågren, G. I., Anderson, T. R., Elser, J. J., & De Ruiter, P. C. (2004). Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecology*, 85(5), 1179-1192.
- 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

- Instituto de Ciencias Naturales [ICN] (2004). *Casearia ulmifolia*. Disponible en: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN/?controlador=QuickSearch{\&}accion=searchByScientific{\&}keyword=Casearia ulmifolia>
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2016). Selección y colección de muestras (NTP 251.008). Lima: Instituto Nacional de Calidad.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1996). Chapter 5: Land Use Change & Forestry. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Revised Version. London. 3: 57 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lamlom, S. H., & Savidge, R. A. (2003). A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 381-388.
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., ... & Fang, J. (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 15(3), 693.
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T. R., Wright, J., Phillips, O. L., Cochrane, T., ... & Vinceti, B. (2006). The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12(7), 1107-1138.
- Martin, A. R., & Thomas, S. C. (2011). A reassessment of carbon content in tropical trees. *PloS one*, 6(8), e23533.
- Martin, A. R., Domke, G. M., Doraisami, M., & Thomas, S. C. (2021). Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications*, 12(1), 889

- Martínez, P. E. P. (2014). Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*, 2(1), 45-52.
- Martínez-Vilalta, J., Sala, A., Asensio, D., Galiano, L., Hoch, G., Palacio, S., ... & Lloret, F. (2016). Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: a global synthesis. *Ecological Monographs*, 86(4), 495-516.
- Mendoza de Armas, C. y Jiménez, G. (2017). Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Nacional de Agronomía – Medellín*, 70(2).
- MINAM. (2014). Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial-Lima: Ministerio del Ambiente. 32 p.
- Muller-Landau, H. C. (2004). Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. *Biotropica*, 36(1), 20-32.
- Nogueira, E. M., Fearnside, P. M., Nelson, B. W., & França, M. B. (2007). Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest ecology and management*, 248(3), 119-135.
- Paroshy, N. J., Doraisami, M., Kish, R., & Martin, A. R. (2021). Carbon concentration in the world's trees across climatic gradients. *New Phytologist*, 232(1), 123-133.
- Peng, Y., Shi, L., Hou, X., & Zhang, Y. (2025). Carbon in woody debris and charcoal layer in cold temperate coniferous forest 13 years after a severe wildfire. *Forests*, 16(4), 685
- Peñuela, M. C., & Jiménez, E. M. (2010). Plantas del Centro Experimental Amazónico–CEA–Mocoa, Putumayo. *Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía–Corpoamazonia. Universidad Nacional de Colombia*, 424.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., ... & Rozendaal, D. M. A. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211–214.

- Poorter, L., Werger, M. J. A., & Williams, R. J. (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life-history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185(2), 481–492
- Power, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *Ingeniería Industrial*, 27, 101-122.
- Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Delmas, R. J., & Lorius, C. (1993). The ice record of greenhouse gases. *Science*, 926-934.
- Reynel, C., Pennington, T. D., Pennington, R. T., Flores, C., & Daza, A. (2003). *Árboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos. Manual de identificación ecológica y propagación de las especies*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Romanelli, G. P., Ruiz, D. M., & Pasquale, G. A. (2016). Química de la biomasa y los biocombustibles. Universidad de La Plata.
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, R., Hergoualc'h, K., & Verhot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219-225.
- Schlesinger, W. H. and Bernhardt, E. S. (2013): Chapter 5 – The Biosphere: The Carbon Cycle of Terrestrial Ecosystems, in: Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd Edition, Academic Press, Boston, MA, USA, 135–171.
- Steyermark, J. A. (1988). Flora of the venezuelan Guayana-VI. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1565-1586.
- Thomas, S. C., & Malczewski, G. (2007). Wood carbon content of tree species in Eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environmental Management*, 85(3), 659-662.

- Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2012). Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests*, 3(2), 332-352.
- Trombley, J. B., Wang, C., & Thennadil, S. N. (2023). Model-free measurements of calorific content and ash content of mixed garden wastes using a bomb calorimeter. *Fuel*, 352, 129105.
- 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.
- Vallejo, Á. (2009). Cambio climático, bosques y uso de la tierra. *Curso Formulación de Proyectos MDL Forestal y Bioenergía. Carbón Decisiones. Buenos Aires, Argentina*, 16-20.
- 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, 171095
- Williamson, G. B., & Wiemann, M. C. (2010). Measuring wood specific gravity... correctly. *American Journal of Botany*, 97(3), 519-524.
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., ... & Chave, J. (2009). Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad Digital Repository*.
- Zmarzty, S. (2007). Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil: Flacourtiaceae. *Rodriguésia*, 58(3), 663-694.

ANEXO

Anexo A. Análisis de varianza de las medias de las fuentes de variación

Tabla 7. Análisis de varianza (ANVA) para la densidad básica

Fuente de variación	SC	GL	MC	FC	SIG
Tratamiento (especies)	0,780	2	0,390	242,749	0,000
Error experimental	0,098	61	0,002		
Total corregido	0,878	63			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa ($P < 0,01$)

Tabla 8. Análisis de varianza (ANVA) para el carbono elemental

Fuente de variación	SC	GL	MC	FC	SIG
Tratamiento (especies)	118,179	2	59,089	72,737	**
Error experimental	4,874	6	0,812		
Total corregido	123,053	8			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa ($P < 0,01$)

Anexo B. Panel fotográfico del proceso de ejecución del trabajo



Figura 2. Medición del DAP de un árbol de *C. ulmofolia*



Figura 3. Extracción de un cilindro de madera a partir de un árbol de *J. copaia*.



Figura 4. Medición de la longitud de la muestra de cilindro



Figura 5. Muestra de cilindros de madera en proceso de secado en horno



Figura 6. Pesaje de una muestra seca en estufa usando una balanza analítica

Tabla 9.Resultados de laboratorio del carbono elemental por especie

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
LABORATORIO DE FITOQUÍMICA FORESTAL
Carretera Central Km. 1.21, Tingo María-Huánuco (epif.labfitoquimica@unas.edu.pe)



*“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”
“En el cuidado de los bosques está el Corazón del Ingeniero Forestal”*

INFORME N° 004-2025- FEAM/LF-EPIF-FRNR-UNAS

A : CARLOS JOSUE CASTRE MORALES
DE : Dra. Tania Elizabeth Guerrero Vejarano
Jefa – Laboratorio Fitoquímica Forestal
ASUNTO : Informe de análisis de CHNS en muestras de madera (aserrín)
FECHA : Tingo María, 04 de agosto de 2025

Los análisis para determinar CHNS se realizaron en el equipo ANALIZADOR ELEMENTAL FLASH SMART THERMO SCIENTIFIC. El Estándar utilizado fue el SULFANILIMIDE STD FLASK OF P,05 y el VANADIUM PENTOXIDE.

Los datos obtenidos de las evaluaciones derivan de la siguiente muestra:

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	01/08/2024 Hora: 12:00 p.m.
Solicitante	Carlos Josué Castre Morales
Tipo de muestra	Madera (aserrín)
Código	HG-F1, HG-F2, HG-F3, JC-F1, JC-F2, JC-F3, CU-F1, CU-F2, CU-F3
Cantidad muestra	3 bolsas de 20gr cada una
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	00052014
Observaciones	Análisis determinación de CHNS

2. Programación del experimento

Equipo	ANALIZADOR ELEMENTAL FLASH SMART
Marca	THERMO SCIENTIFIC
Calibración	SULFANILIMIDE STD FLASK OF P,05 y el VANADIUM PENTOXIDE
Nombre del experimento	Análisis determinación de CHNS
Peso de la muestra	3gr x muestra aproximadamente

3. Estándar interno

El estándar de calibración que se utilizó para la lectura fue SULFANILIMIDE STD FLASK OF P,05 y el VANADIUM PENTOXIDE

4. Preparación de muestra

- Se codificaron las muestras de madera (aserrín) de la siguiente manera:

Muestra = HG-F

Muestra = JC-F

Muestra = CU-F

- Se pesaron tres repeticiones por cada muestra y cada repetición se agregó el estándar de calibración que en este caso fue vanadio y se obtuvieron los siguientes pesos:

N° de posición en rack de muestras	Código de muestras + Estándar	peso (mg)
10	HG-F1	2.80
	VANADIO	9.77
11	HGF-2	2.84
	VANADIO	9.81
12	HGF-3	2.77
	VANADIO	9.75
19	JCF-1	2.78
	VANADIO	9.53
20	JCF-2	2.94
	VANADIO	9.86
21	JCF-3	2.87
	VANADIO	9.71
28	CUF-1	2.75
	VANADIO	9.73
29	CUF-2	2.71
	VANADIO	9.74
30	CUF-3	2.99
	VANADIO	9.96

5. Preparación de Estándares

- Se utilizaron 2 estándares de calibración que fueron el SULFANILIMIDE STD FLASK OF P,05 y el VANADIUM PENTOXIDE, los cuales se pesaron y se colocaron de la siguiente manera:

Nº de posición en rack de muestras	Estándares de calibración	peso (mg)
1	SULFINAMIDE	2.74
	VANADIO	9.30
2	SULFINAMIDE	2.55
	VANADIO	9.81
3	SULFINAMIDE	2.58
	VANADIO	9.53
4	SULFINAMIDE	2.73
	VANADIO	9.79

6. Resultados del análisis

Muestras	peso (mg)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)	O (%)
HG-F1	2.8	47.51	11.31	8.55	0.02	32.61
HGF-2	2.84	48.70	10.52	9.20	0.04	31.55
HGF-3	2.77	47.50	9.55	9.15	0.02	33.78
JCF-1	2.78	44.80	8.69	8.95	0.03	37.53
JCF-2	2.94	46.89	9.55	9.32	0.03	34.21
JCF-3	2.87	46.78	9.88	9.35	0.03	33.96
CUF-1	2.75	54.56	10.19	9.78	0.02	25.45
CUF-2	2.71	55.33	9.65	10.21	0.02	24.79
CUF-3	2.99	53.81	9.32	8.99	0.01	27.87




Dra. Tania E. Guerrero Vejarano
Jefa del Laboratorio de Fitoquímica Forestal

Tabla 10. Certificado de la identificación de las especies en estudio

Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad de Recursos Naturales Renovables
Departamento Académico de Ciencias Ambientales
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental
Cátedra de Ecología y Sistemática Vegetal

C-009-2024-JB-FRNR-UNAS

CERTIFICADO

El que suscribe, profesor de Ecología con línea de investigación en Sistemática Vegetal, de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, certifica que los especímenes botánicos colectados en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, distrito Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado, departamento Huánuco, correspondientes al proyecto de tesis “CARBONO ELEMENTAL DE TRES ESPECIES FORESTALES DEL BOSQUE RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, TINGO MARÍA”, presentado por el Ing. Carlos Josue CASTRE MORALES, para su determinación pertenecen a las especies que se indican a continuación:

Nº	Nombre Científico	Familia	Nombre Común
1	<i>Casearia ulmifolia</i> Vahl ex Vent.	Saliacaceae	Timareo
2	<i>Hevea guianensis</i> Aubl.	Euphorbiaceae	Shiringa
3	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don	Bignoniaceae	Huamanzamana

Se expide el presente certificado para los fines pertinentes.

Tingo María, 19 de octubre del 2024



Dr. Edilberto Chuquilín Bustamante
Profesor Principal
Jefe del Jardín Botánico-UNAS
Cátedra de Ecología y Sistemática Vegetal
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental
Facultad de Recursos Naturales Renovables
Universidad Nacional Agraria de la Selva

Tabla 11. Abundancia de especies ároreas registradas en el BRUNAS

Nombre científico	Individuos/ha
<i>Pseudosenefeldera inclinata</i> (Müll.Arg.) Esser	128,125
<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke	40,625
<i>Pourouma minor</i> Benoist	31,250
<i>Casearia ulmifolia</i> Vahl ex Vent.	23,958
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don	21,875
<i>Hevea guianensis</i> Aubl.	20,833
<i>Miconia barbeyana</i> Cogn.	19,792
<i>Macrolobium gracile</i> Spruce ex Benth.	17,708
<i>Virola pavonis</i> (A. DC.) A. C. Sm.	17,708
<i>Guatteria guentheri</i> Diels	16,667
<i>Euterpe precatoria</i> Mart.	14,583
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC.	13,542
<i>Pourouma cecropiifolia</i> Mart.	13,542
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	11,458
<i>Aniba perutilis</i> Hemsl.	10,417
<i>Didymopanax morototoni</i> (Aubl.) Decne. & Planch.	10,417
<i>Palicourea levis</i> Standl.	10,417
<i>Pourouma bicolor</i> Mart.	10,417
<i>Pseudolmedia laevis</i> (Ruiz & Pav.) J. F. Macbr.	10,417
<i>Theobroma subincanum</i> Mart.	10,417
<i>Parkia panurensis</i> Benth. ex H.C.Hopkins	9,375
<i>Protium sagotianum</i> Marchand	9,375
<i>Trattinnickia peruviana</i> Loes.	9,375
<i>Cecropia sciadophylla</i> Mart.	8,333
<i>Mespilodaphne opifera</i> (Mart.) Meisn.	8,333
<i>Protium aracouchini</i> (Aubl.) Marchand	8,333
<i>Leonia glycyarpa</i> Ruiz & Pav.	7,292
<i>Couepia obovata</i> Ducke	6,250
<i>Helicostylis tomentosa</i> (Poepp. & Endl.) J. F. Macbr.	6,250
<i>Lacistema nena</i> J. F. Macbr.	6,250
<i>Micropholis egensis</i> (A.DC.) Pierre	6,250
<i>Osteophloeum platyspermum</i> (A. DC.) Warb.	6,250
<i>Virola elongata</i> (Benth.) Warb.	6,250
<i>Apeiba glabra</i> Aubl.	5,208