



Evaluación del crecimiento y biomasa aérea de cuatro especies forestales nativas en plantación forestal en Ucayali, Perú.

Assessment of growth and above-ground biomass of four native forest species in a forest plantation in Ucayali, Peru.

Ymber Flores Bendezú

RESUMEN

La selección adecuada de especies forestales es esencial para la restauración ecológica y la producción sostenible en la Amazonía peruana, donde la deforestación ha degradado extensas áreas boscosas. Pese a la importancia de este tema, existe escasa información sobre el desempeño a largo plazo de especies nativas en plantaciones experimentales, lo que limita la orientación de programas de reforestación. Este estudio evaluó el crecimiento y la biomasa aérea de cuatro especies forestales (*Ormosia macrocalyx*, *Aspidosperma desmanthum*, *Dipteryx ferrea* y *Handroanthus serratifolius*) a los 25 años de edad. El ensayo se estableció en un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones, en el Centro Experimental Alexander von Humboldt (Ucayali), ubicado en un bosque húmedo tropical con suelos Ultisol. Se midieron altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial y biomasa aérea. Los resultados muestran que *D. ferrea* alcanzó el mejor desempeño, con 95% de supervivencia, DAP promedio de 27.4 cm, altura total de 20.8 m y biomasa de 998.8 kg, superando significativamente ($p < 0.05$) a las demás especies en todas las variables. *H. serratifolius* presentó valores intermedios, mientras que *A. desmanthum* y *O. macrocalyx* registraron baja supervivencia y menor crecimiento. El efecto de bloque no fue significativo, lo que indica homogeneidad ambiental. En conclusión, *D. ferrea* muestra el mayor potencial para reforestación y plantaciones comerciales en condiciones similares, seguida por *H. serratifolius*. Se recomienda continuar con estudios de largo plazo que integren variables ecológicas y prácticas silviculturales para fortalecer la sostenibilidad de estos sistemas.

Palabras clave: biomasa aérea, crecimiento, *Dipteryx ferrea*, *Handroanthus serratifolius*, plantación forestal.

ABSTRACT

The appropriate selection of forest species is essential for ecological restoration and sustainable production in the Peruvian Amazon, where deforestation has degraded extensive forest areas. Despite the importance of this issue, there is little information on the long-term performance of native species in experimental plantations, which limits the guidance of reforestation programs. This study evaluated the growth and above-ground biomass of four forest species (*Ormosia macrocalyx*, *Aspidosperma desmanthum*, *Dipteryx ferrea*, and *Handroanthus serratifolius*) at 25 years of age. The trial was established in a completely randomized block design with three replicates at the Alexander von Humboldt Experimental Center (Ucayali), located in a tropical rainforest with Ultisol soils. Total height, diameter at breast height (DBH), commercial height, and above-ground biomass were measured. The results show that *D. ferrea* achieved the best performance, with 95% survival, an average DBH of 27.4 cm, total height of 20.8 m, and biomass of 998.8 kg, significantly ($p < 0.05$) outperforming the other species in all variables. *H. serratifolius* showed intermediate values, while *A. desmanthum* and *O. macrocalyx* recorded low survival and lower growth. The block effect was not significant, indicating environmental homogeneity. In conclusion, *D. ferrea* shows the greatest potential for reforestation and commercial plantations under similar conditions, followed by *H. serratifolius*. It is recommended to continue with long-term studies that integrate ecological variables and silvicultural practices to strengthen the sustainability of these systems.

Keywords: aboveground biomass, *Dipteryx ferrea*, forest plantation, growth, *Handroanthus serratifolius*.

I. INTRODUCCIÓN

La Amazonía peruana es uno de los principales hotspots de biodiversidad del planeta que alberga una gran variedad de especies vegetales y animales únicas que cumplen funciones ecológicas vitales como la regulación climática, el ciclo hidrológico y el almacenamiento de carbono, primordiales para la salud ambiental global (Albert et al., 2023; Flores et al., 2024; Lapola et al., 2023). Sin embargo, esta riqueza natural enfrenta una acelerada degradación como consecuencia de múltiples presiones antrópicas que actúan de manera simultánea y sinérgica como la agricultura migratoria y expansión de la frontera agropecuaria, tala ilegal y sobreexplotación, minería y extracción de recursos, expansión urbana y vías, incendios y sequías extremas y una débil gobernanza y planificación territorial (Berenguer et al., 2024; Cruz et al., 2023; da Silva Junior et al., 2022; Espejo et al., 2018; Glinskis & Gutiérrez-Vélez, 2019).

Frente a esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias orientadas a mitigar los impactos de la degradación ambiental. Entre ellas, la reforestación con especies forestales nativas destaca como una herramienta clave para la restauración ecológica y el fortalecimiento de la resiliencia territorial. Este enfoque busca recuperar la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas degradados mediante la implementación de modelos silvícolas adaptados a las condiciones locales, contribuyendo así tanto a la recuperación ecológica como al desarrollo sostenible de la región amazónica.

En ese marco, la evaluación del crecimiento y la biomasa aérea (AGB) en plantaciones de especies nativas constituye un componente esencial, pues permite estimar la capacidad de fijación de carbono de los ecosistemas forestales un indicador directamente asociado al carbono almacenado en los bosques y, al mismo tiempo, identificar las especies con mayor eficiencia en el uso de recursos. Este conocimiento es fundamental para optimizar los programas de reforestación y restauración, dado que la acumulación diferencial de biomasa refleja el potencial de cada especie bajo condiciones específicas (Cao et al., 2025; Khan et al., 2025).

Además, el AGB se ha consolidado como un criterio ampliamente empleado para evaluar la efectividad de los programas de restauración, ya que permite comparar el desempeño de distintas especies y técnicas de manejo en términos de productividad y provisión de servicios ecosistémicos (Nave et al., 2018). En este sentido, los estudios comparativos del crecimiento y la biomasa de especies nativas bajo condiciones controladas generan evidencia científica valiosa para priorizar aquellas con mayor potencial ecológico y comercial, aportando así insumos técnicos para políticas de manejo forestal sostenible.

La variabilidad observada en el crecimiento y la acumulación de biomasa entre especies responde a su plasticidad fisiológica y a su grado de adaptación a suelos tropicales de baja fertilidad, como los Ultisoles característicos de la Amazonía peruana (Chaturvedi et al., 2023; Oliveira et al., 2019; Toledo et al., 2017). En esa línea, investigaciones previas han abordado la recuperación de biomasa aérea y el diámetro a la altura del pecho (DAP) en bosques secundarios (Aragón et al., 2021), la dinámica estructural en sucesión postminera (Garate-Quispe et al., 2024) y el crecimiento y supervivencia de especies nativas en sitios degradados (Chávez & Sabogal, 2019). En conjunto, estos estudios establecen la biomasa, la altura, el DAP y la supervivencia como indicadores clave del desempeño de especies forestales en procesos de restauración ecológica.

En ese contexto, el presente estudio evaluó el desempeño de cuatro especies forestales nativas de alta relevancia ecológica y económica en la Amazonía peruana: *Ormosia macrocalyx*, apreciada por su madera, semillas ornamentales y potencial agroforestal; *Aspidosperma desmanthum*, valorada por su madera de densidad media y uso en construcción; *Dipteryx ferrea*, destacada por su elevada densidad maderable, rápido crecimiento y capacidad de almacenamiento de carbono; y *Handroanthus serratifolius*, reconocida por su valor ornamental y la durabilidad de su madera. Estas especies fueron seleccionadas por su adaptabilidad a suelos ácidos, su capacidad de establecerse en áreas degradadas y su contribución potencial a la restauración ecológica y

al desarrollo de la economía forestal (Flores Bendezú, 2019, 2025a, 2025b; Chávez & Sabogal, 2019; Luize et al., 2024; Rolim & Piotto, 2024; Romero, Jacovine, Carneiro, Chaves, Bezerra, Lafuente, da Rocha, Lopes, & Fearnside, 2025).

Con base en lo anterior, el estudio tuvo como objetivo evaluar el crecimiento y la biomasa aérea de estas especies a los 25 años de edad, establecidas en suelos Ultisol del Centro Experimental Alexander von Humboldt, en Ucayali. Este análisis busca generar información técnica que oriente la selección de especies idóneas para programas de reforestación, restauración ecológica y producción forestal sostenible en la Amazonía peruana. Para ello, se plantearon las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el desempeño en términos de crecimiento y biomasa aérea de las especies evaluadas en condiciones de suelos Ultisol en Ucayali, después de 25 años de plantación? y ¿Qué especies presentan mayor potencial para reforestación y plantaciones comerciales en la región amazónica?

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Centro Experimental Alexander von Humboldt (figura 1), ubicado a 86 km de la ciudad de Pucallpa, distrito de Von

Humboldt, provincia de Padre Abad, región Ucayali (8°20'00" S, 75°03'00" O). El sitio experimental, a una altitud de 220 m s.n.m., corresponde a un bosque secundario bajo, utilizado durante una década para cultivos tradicionales como arroz, maíz, yuca, soya y algodón. Posteriormente, tras un período de barbecho, en el año 2000 se establecieron las plantaciones experimentales. La zona pertenece a un ecosistema de bosque húmedo tropical siempre verde, caracterizado por temperaturas elevadas y estables, y precipitaciones abundantes durante todo el año.

Según datos climáticos de la Estación Macuya (2012–2017) reportados por Rengifo (2018), la temperatura media anual fue de 26.37 °C, con máximas promedio de 31.60 °C y mínimas de 21.27 °C. La precipitación anual promedio alcanzó los 2211.69 mm, confirmando las condiciones cálidas y húmedas típicas de la región de Ucayali.

El suelo del sitio experimental corresponde a un Ultisol de textura franco-arenosa (52.96% arena, 32.28% limo y 14.76% arcilla), caracterizado por buena aireación y capacidad de retención de agua. Presenta un pH ácido (4.58) y alta acidez intercambiable (4.1 mEq), lo que indica presencia de aluminio potencialmente tóxico. El calcio (2.22 mEq) y el magnesio (0.88 mEq) son moderados, mientras que el potasio (0.22 mEq) y el fósforo (5.50 ppm) son bajos.

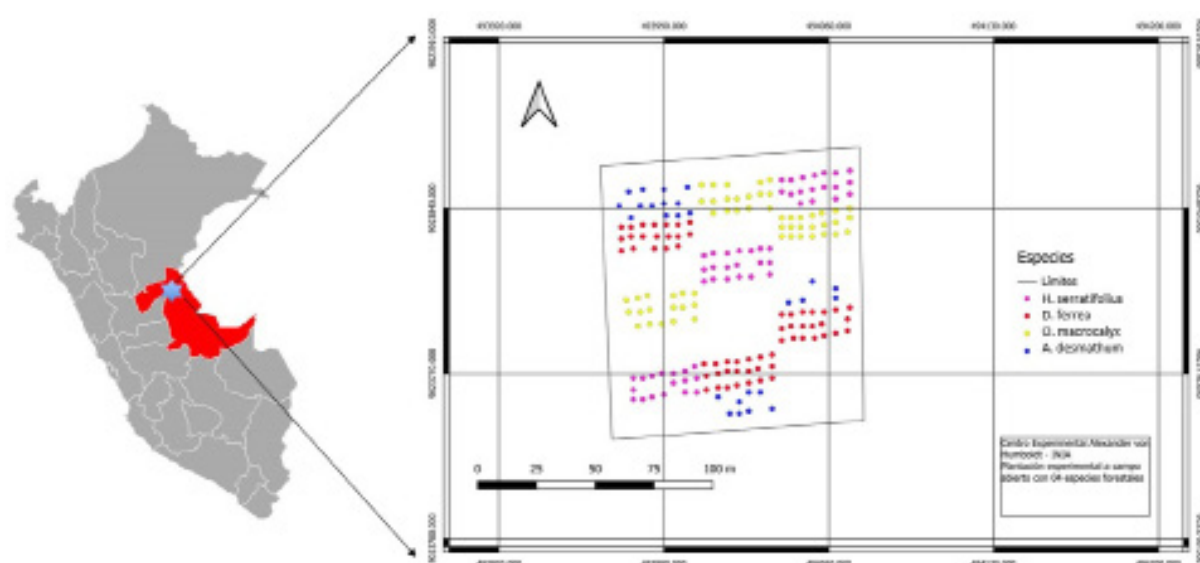


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Centro Experimental Alexander Von Humboldt, Ucayali.

Sin embargo, el suelo posee un adecuado contenido de materia orgánica (4.32%) y nitrógeno total (0.17%). La pendiente promedio del 23% favorece procesos erosivos, lo que sugiere la necesidad de un manejo edáfico especializado (Ramírez Altamirano, 2000; Department of Agriculture, 2017).

Diseño experimental

Se aplicó un diseño en bloques completamente al azar (DBCA) con tres bloques dispuestos a lo largo de la ladera, correspondientes a las posiciones alta, media y baja. La estratificación consideró la topografía y las variaciones visibles del terreno, permitiendo conformar unidades experimentales con condiciones edáficas y microclimáticas relativamente homogéneas (humedad, escorrentía y exposición solar). Este enfoque redujo la influencia de la variabilidad ambiental en la comparación entre especies. Se evaluaron cuatro especies forestales nativas de interés ecológico y económico:

T1: *Ormosia macrocalyx* (huayruru rojo)

T2: *Aspidosperma desmanthum* (quillobordón colorado)

T3: *Dipteryx ferrea* (shihuahuaco)

T4: *Handroanthus serratifolius* (tahuarí amarillo)

Los individuos tenían 25 años de edad al momento de la evaluación. Los tratamientos se distribuyeron aleatoriamente dentro de los bloques, con tres repeticiones por especie. Cada unidad experimental estuvo conformada por 21 árboles, establecidos con un espaciamiento inicial de 5×5 m.

Variables evaluadas

Se midieron cuatro variables de crecimiento:

- (i) Diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), medido a 1.3 m del suelo con calibrador o cinta diamétrica;
- (ii) Altura total (m), registrada desde la base hasta el ápice del árbol;
- (iii) Altura comercial (m), medida hasta la primera bifurcación o defecto; y
- (iv) Área de copa (m^2), calculada como una elipse a partir de los diámetros mayor y menor medidos con cinta métrica.

Las mediciones se realizaron según el Sistema MIRA-SILV (Ugalde, 2000).

La supervivencia (%) se determinó empleando la fórmula: $\text{Supervivencia (\%)} = (\text{N}^\circ \text{ de árboles vivos} / \text{N}^\circ \text{ de árboles iniciales}) \times 100$.

Los valores de supervivencia se calcularon por parcela y especie, y posteriormente se incluyeron en los análisis comparativos.

Estimación de biomasa aérea

La biomasa aérea (AGB), que comprende tronco, ramas, hojas y corteza, se estimó mediante la ecuación alométrica de Chave et al. (2014), desarrollada para bosques tropicales húmedos. Esta ecuación incorpora el DAP, la altura total y la densidad de la madera (g/cm^3) específica por especie. Las densidades utilizadas fueron: *O. macrocalyx*, $0.675 g/cm^3$ (Loureiro & Lisboa, 1979), *D. ferrea*, $0.89 g/cm^3$ (Pérez Robalino, 2023), *A. desmanthum*, $0.69 g/cm^3$, y *H. serratifolius*, $0.92 g/cm^3$ (Carneiro et al., 2020; Gérard et al., 2017).

Estas densidades se seleccionaron considerando la edad y el tipo de plantación, a fin de asegurar estimaciones representativas de la biomasa real.

Análisis estadístico

El análisis de datos se realizó en R versión 4.4 (Posit Software, 2024). Se empleó un modelo lineal aditivo, apropiado para experimentos en bloques completamente aleatorizados, con la siguiente estructura:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde:

Y_{ij} : variable de respuesta (incluida la AGB),

μ : media general,

τ_i : efecto del tratamiento (especie),

β_j : efecto del bloque,

ϵ_{ij} : error aleatorio $\sim N(0, \sigma^2)$.

Se aplicó ANOVA de una vía, considerando como factor fijo la especie forestal y como factor aleatorio el bloque (posición topográfica). La normalidad de los residuos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Monter-Pozos & González-Estrada, 2024), y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Bartlett (Snedecor & Cochran, 1989).

Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizó la prueba de Tukey HSD para comparaciones múltiples. Los resultados se presentaron como medias $\pm$ desviación estándar, y se visualizaron mediante diagramas de barras y cajas, a fin de facilitar la interpretación y comparación del desempeño entre especies.

III. RESULTADOS

Los análisis preliminares confirmaron el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, validando la aplicación del ANOVA dentro del diseño en bloques completamente al azar. No se detectaron efectos significativos del factor bloque, lo que confirma la homogeneidad ambiental del sitio experimental y la confiabilidad de las comparaciones entre especies (tabla 1).

Supervivencia de especies

La supervivencia a los 25 años mostró diferencias marcadas entre tratamientos (figura 2a). *Dipteryx ferrea* y *Handroanthus serratifolius* registraron los valores más altos (95 % y 87 %, respectivamente), evidenciando su adecuada adaptación a los suelos ácidos tipo Ultisol y a las condiciones locales de manejo. En contraste, *Aspidosperma desmanthum* presentó la menor supervivencia (43 %), mientras que *Ormosia macrocalyx* alcanzó un nivel intermedio (80 %), lo que sugiere una tolerancia moderada al estrés edáfico.

Crecimiento en diámetro y altura

El diámetro a la altura del pecho (DAP) difirió significativamente entre especies (figura 2b). *D. ferrea* obtuvo el mayor valor promedio (27 cm), reflejando su elevado vigor y rápido crecimiento diamétrico. Le siguieron *H. serratifolius* (21 cm) y *A. desmanthum* (19,5 cm), mientras que *O. macrocalyx* mostró el menor desarrollo (15 cm).

La altura total (figura 2c) mantuvo la misma tendencia, con *D. ferrea* alcanzando más de 21 m, seguido por *A. desmanthum* (18 m), *H. serratifolius* (14 m) y *O. macrocalyx* (12 m). Sin embargo, la altura comercial (figura 2d) presentó un patrón distinto: *A. desmanthum*

mostró el mayor valor (11,5 m), superando incluso a *D. ferrea* (10 m), lo que evidencia un fuste más limpio y de mayor valor maderable. .

Estructura de copa

El área de copa (figura 2e) también varió entre especies. *D. ferrea* presentó el promedio más alto (33 m²) y una notable dispersión, indicativa de su alta plasticidad ecológica y capacidad competitiva por luz. *H. serratifolius* y *A. desmanthum* alcanzaron valores intermedios (20–25 m²), mientras que *O. macrocalyx* registró las copas más reducidas (11 m²), coherentes con su menor crecimiento general.

Biomasa aérea acumulada

La biomasa aérea (AGB) evidenció diferencias altamente significativas entre especies (figura 2f). *D. ferrea* sobresalió con un promedio cercano a 1000 kg árbol, triplicando los valores de las demás especies. *H. serratifolius* y *A. desmanthum* mostraron rendimientos similares (320–350 kg árbol), mientras que *O. macrocalyx* alcanzó apenas 100 kg árbol. Este comportamiento confirma el alto potencial de *D. ferrea* para acumulación de biomasa y fijación de carbono, siendo una especie estratégica para plantaciones de largo plazo en suelos degradados.

Los valores promedio de las variables evaluadas para cada especie se presentan en la tabla 2, junto con las agrupaciones estadísticas obtenidas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). En la figura 3 se visualizan estas diferencias, evidenciando un desempeño contrastante entre especies bajo condiciones de suelo ácido y pendiente pronunciada.

En este contexto, *D. ferrea* se perfila como la especie más productiva y resiliente, con el mayor crecimiento y acumulación de biomasa; *A. desmanthum* destaca por su fuste recto y potencial maderable; *H. serratifolius* combina alta supervivencia y crecimiento intermedio estable; mientras que *O. macrocalyx*, aunque con menor desempeño, contribuye a la diversidad funcional de las plantaciones y ofrece valor ecológico dentro de esquemas de restauración y manejo sostenible en la Amazonia peruana.

Tabla 1. Valores promedio $\pm$ desviación estándar de las variables de supervivencia, crecimiento y biomasa aérea por tratamiento (T1–T4) y bloque (I–III).

Tratamiento	Bloque	Supervivencia (%)	DAP (cm)	Altura total (m)	Altura comercial (m)	Área de copa (m ²)	AGB Biomasa aérea del árbol en kilogramos (kg).
T1	I	81	13.24 $\pm$ 3.83	8.22 $\pm$ 1.79	3.95 $\pm$ 0.71	9.65 $\pm$ 5.64	64.96 $\pm$ 44.93
T1	II	100	17.56 $\pm$ 5.09	9.99 $\pm$ 2.24	4.48 $\pm$ 0.88	16.1 $\pm$ 8.26	136.79 $\pm$ 98.52
T1	III	81	14.39 $\pm$ 3.17	9.13 $\pm$ 1.91	5.47 $\pm$ 1.27	7.49 $\pm$ 3.41	79.61 $\pm$ 49.29
T2	I	62	19.19 $\pm$ 5.05	19.94 $\pm$ 4.30	13.48 $\pm$ 3.75	17.12 $\pm$ 13.36	315.21 $\pm$ 183.44
T2	II	24	22.68 $\pm$ 6.30	18.64 $\pm$ 1.60	9.6 $\pm$ 2.26	19.89 $\pm$ 10.69	383.42 $\pm$ 217.74
T2	III	38	19.43 $\pm$ 6.44	17.72 $\pm$ 6.08	11.46 $\pm$ 3.73	9.7 $\pm$ 6.74	257.19 $\pm$ 141.86
T3	I	90	27.45 $\pm$ 8.13	22.38 $\pm$ 4.95	9.6 $\pm$ 2.99	51.24 $\pm$ 28.45	1056.65 $\pm$ 681.01
T3	II	100	29.63 $\pm$ 8.84	19.23 $\pm$ 6.17	12.02 $\pm$ 3.33	23.53 $\pm$ 14.5	967.28 $\pm$ 733.72
T3	III	95	25.50 $\pm$ 9.36	18.37 $\pm$ 4.76	7.77 $\pm$ 2.73	23.84 $\pm$ 11.59	732.69 $\pm$ 706.09
T4	I	86	19.12 $\pm$ 2.95	13.85 $\pm$ 2.32	6.73 $\pm$ 2.08	26.24 $\pm$ 9.39	263.1 $\pm$ 101.28
T4	II	90	21.63 $\pm$ 5.38	14.31 $\pm$ 4.23	5.73 $\pm$ 2.04	30.68 $\pm$ 17.01	407.31 $\pm$ 295.36
T4	III	81	21.28 $\pm$ 5.58	14.63 $\pm$ 3.57	7.6 $\pm$ 2.23	20.98 $\pm$ 12.59	367.92 $\pm$ 239.61

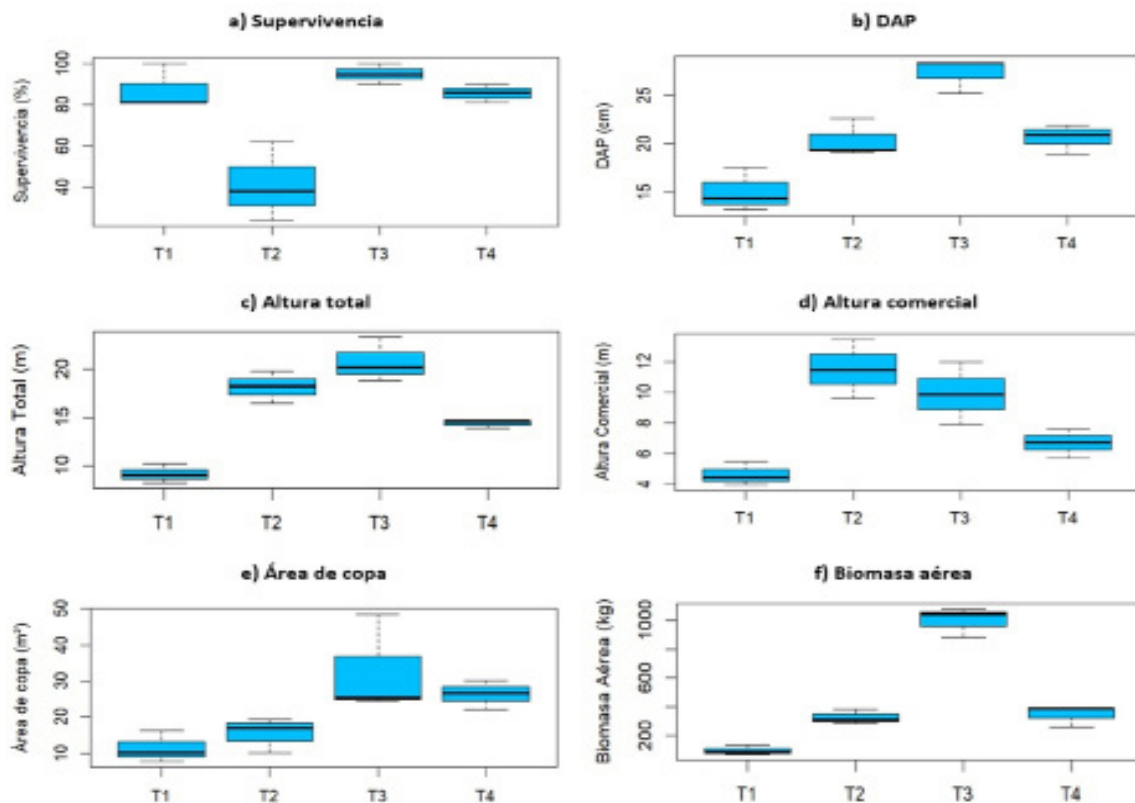
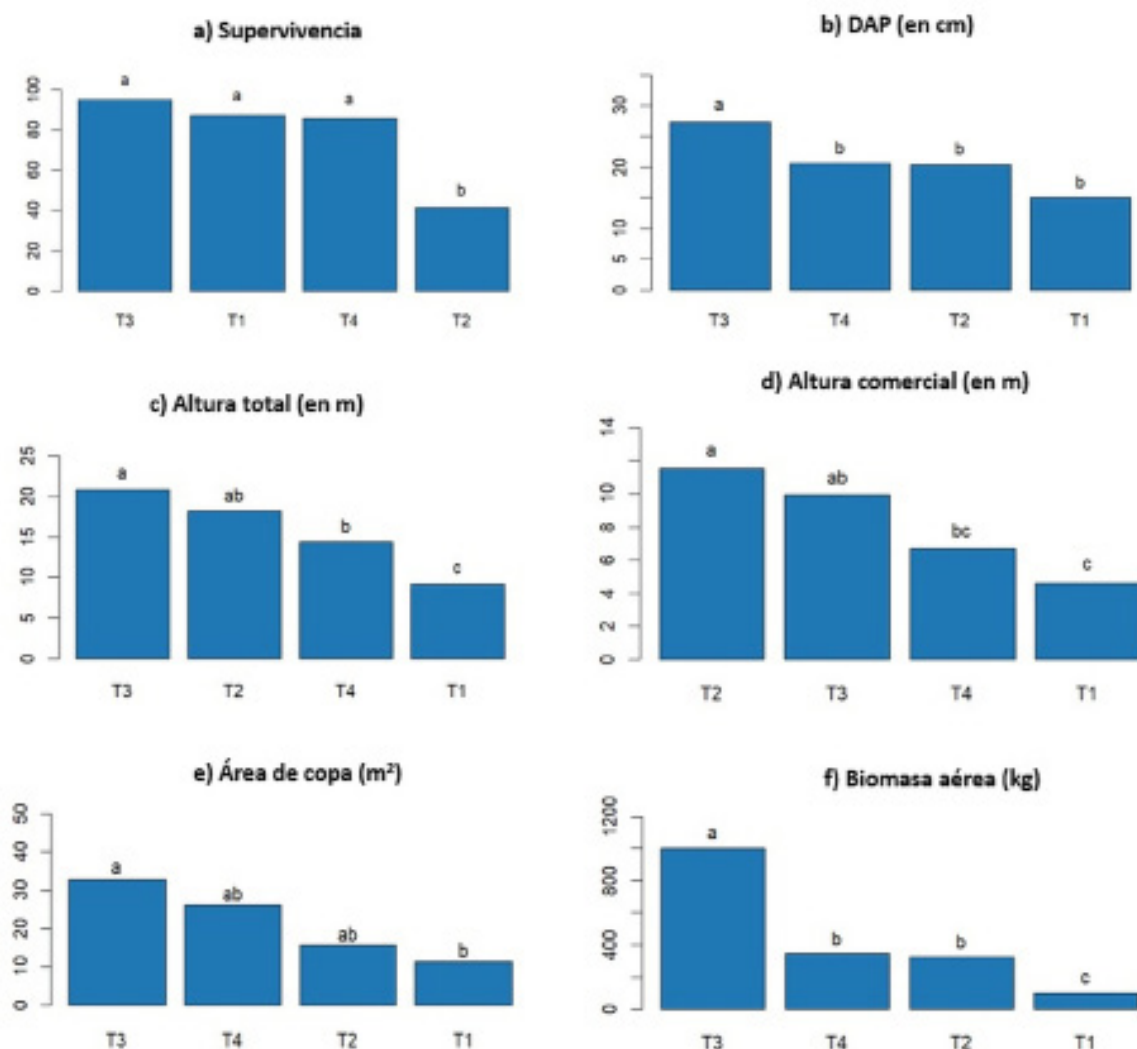


Figura 2. Comparación de variables dendrométricas y de biomasa aérea entre tratamientos (especies). Se presentan diagramas de caja para (a) Supervivencia (%), (b) Diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), (c) Altura total (m), (d) Altura comercial (m), (e) Área de copa (m²) y (f) Biomasa aérea (kg) en cuatro tratamientos (T1: *O. macrocalyx*, T2: *A. desmanthum*, T3: *D. ferrea*, T4: *H. serratifolius*).

Tabla 2. Valores de supervivencia, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, altura comercial, área de copa y biomasa aérea para las especies evaluadas.

Especie	Superviven- cia (%)	DAP (cm)	Altura Total (m)	Altura Comercial (m)	Área de Copa (m ²)	Biomasa Aérea (kg)
T1: <i>Ormosia macrocalyx</i>	87.3 a	15.2 b	9.14 c	4.63 c	11.47 c	97.9 d
T2: <i>Aspidosperma desmanthum</i>	41.3 b	16.8 b	18.20 ab	11.51 a	15.54 bc	326.7 c
T3: <i>Dipteryx ferrea</i>	95.0 a	27.4 a	20.80 a	9.93 ab	32.80 a	998.8 a
T4: <i>Handroanthus serratifolius</i>	85.7 a	17.5 b	14.39 b	6.69 bc	26.35 ab	346.8 b

**Figura 3.** Comparación de medias para variables dendrométricas y de supervivencia entre especies. Se presentan los valores promedio con agrupaciones según la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para (a) Supervivencia (%), (b) Diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), (c) Altura total (m), (d) Altura comercial (m), (e) Área de copa (m²) y (f) Biomasa aérea (kg). Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (T1–T4).

IV. DISCUSIÓN

El presente estudio proporciona evidencia sólida sobre el desempeño comparativo de cuatro especies forestales nativas *Ormosia macrocalyx*, *Aspidosperma desmanthum*, *Dipteryx ferrea* y *Handroanthus serratifolius*, en plantaciones establecidas sobre suelos Ultisol de la Amazonía peruana. A los 25 años de establecimiento, las diferencias significativas en crecimiento y biomasa aérea (AGB) reflejan la marcada variabilidad interespecífica en estrategias de asignación de recursos y en la adaptabilidad fisiológica frente a condiciones edáficas restrictivas. Los valores superiores de AGB obtenidos en *D. ferrea* destacan el papel determinante de la densidad básica de la madera en la productividad y el almacenamiento de carbono. Especies con maderas densas, aunque presentan tasas de crecimiento más lentas, generan reservorios de carbono más estables y duraderos, contribuyendo de manera efectiva a la mitigación del cambio climático. Este patrón coincide con lo reportado por Romero et al. (2024), quienes señalaron la contribución desproporcionada de las especies de madera densa a la dinámica del carbono en bosques tropicales. Asimismo, Lopes et al. (2023) evidenciaron que *Dipteryx spp.* exhibe una notable capacidad para la captura de CO₂ en plantaciones comerciales del Amazonas oriental, concordante con el comportamiento observado en el presente estudio. En contraste, *O. macrocalyx* y *A. desmanthum* mostraron un crecimiento más limitado y menores valores de biomasa, lo que restringe su aporte inmediato al almacenamiento de carbono. No obstante, ambas especies pueden desempeñar un rol funcional complementario dentro de esquemas de restauración ecológica, favoreciendo la diversidad estructural, la resiliencia del sistema y la provisión de servicios ecosistémicos. Este enfoque integrador entre productividad y diversidad resulta esencial para optimizar los programas de reforestación y manejo sostenible en paisajes tropicales degradados. Por su parte, *H. serratifolius* evidenció una alta

supervivencia (87 %), lo que refleja una adaptación eficiente a los suelos ácidos del sitio experimental. Aunque sus valores de diámetro y biomasa fueron intermedios, la combinación de persistencia y crecimiento moderado respalda su valor como especie complementaria en sistemas forestales mixtos sobre suelos degradados (Macedo, 2015). Estudios realizados en la Amazonía brasileña reportan, además, que *H. serratifolius* presenta altos contenidos de carbono en fuste, superiores al valor genérico propuesto por el IPCC (0.47), lo que reafirma su potencial estratégico en plantaciones para captura de carbono (Romero et al., 2025).

Desde una perspectiva metodológica, es importante reconocer que la estimación de AGB se basó en valores promedio de densidad de la madera obtenidos de fuentes bibliográficas. Esta aproximación, si bien ampliamente utilizada, puede introducir incertidumbres asociadas a la variabilidad intraespecífica y vertical de la densidad dentro de un mismo individuo, afectando la precisión a escalas mayores (Romero et al., 2024). Sin embargo, el enfoque comparativo adoptado permitió identificar tendencias consistentes entre especies y generar información de relevancia práctica para el diseño de estrategias de restauración productiva y manejo forestal adaptativo.

En conjunto, los resultados refuerzan la importancia de orientar la gestión forestal hacia criterios que trasciendan la producción maderable, incorporando la conservación del carbono, la resiliencia ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos como ejes de sostenibilidad. En este contexto, especies como *D. ferrea* se perfilan como alternativas de alto valor para plantaciones orientadas a la mitigación climática, mientras que especies de menor biomasa, como *A. desmanthum* y *O. macrocalyx*, pueden contribuir significativamente a la diversificación funcional y estabilidad ecológica de los sistemas forestales amazónicos.

V. CONCLUSIONES

El estudio evidencia diferencias significativas en supervivencia, crecimiento y biomasa aérea entre cuatro especies forestales nativas evaluadas en condiciones experimentales. *Dipteryx ferrea* mostró el mejor desempeño silvicultural entre las especies evaluadas, destacando por su alta supervivencia (95%), mayor crecimiento en DAP, altura total, área de copa y acumulación de biomasa aérea (998.8 kg), lo que evidencia su notable adaptabilidad a suelos ácidos y su potencial para restauración ecológica y producción sostenible en la Amazonía peruana. *Handroanthus serratifolius* tuvo un desarrollo intermedio, con biomasa moderada (346.8 kg), lo que sugiere estabilidad en condiciones variables. En contraste, *Aspidosperma desmanthum* presentó baja supervivencia (41.3%) y escasa biomasa (326.7 kg), lo que indica una adaptación limitada al sitio experimental, posiblemente por su preferencia por ambientes más húmedos. *Ormosia macrocalyx* tuvo el rendimiento más bajo en crecimiento y biomasa (97.9 kg), evidenciando una incompatibilidad ecológica con las condiciones locales. Las diferencias encontradas resaltan la importancia de seleccionar especies en función de sus requerimientos ecológicos específicos. Este estudio aporta información clave para orientar estrategias de reforestación y manejo forestal con especies nativas en suelos degradados, y sugiere ampliar las investigaciones a otras zonas ecológicas, incorporar más bloques y monitorear a largo plazo para evaluar productividad, resiliencia y calidad de madera, contribuyendo así al conocimiento silvicultural regional basado en evidencia científica.

VI. REFERENCIAS

- Albert, J. S., Carnaval, A. C., Flantua, S. G. A., Lohmann, L. G., Ribas, C. C., Riff, D., Carrillo, J. D., Fan, Y., Figueiredo, J. J. P., Guayasamin, J. M., Hoorn, C., de Melo, G. H., Nascimento, N., Quesada, C. A., Ulloa, C. U., Val, P., Arieira, J., Encalada, A. C., & Nobre, C. A. (2023). Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, 379(6630). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABO5003>
- Aragón, S., Salinas, N., Nina-Quispe, A., Huaman Qquellon, V., Rayme Paucar, G., Huaman, W., Chambi Porroa, P., Olarte, J. C., Cruz, R., Muñiz, J. G., Salas Yupayccana, C., Boza Espinoza, T. E., Tito, R., Cosio, E. G., & Roman-Cuesta, R. M. (2021). Aboveground biomass in secondary montane forests in Peru: Slow carbon recovery in agroforestry legacies. *Global Ecology and Conservation*, 28, e01696. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01696>
- Berenguer, E., Armenteras, D., Lees, A. C., Fearnside, P. M., Alencar, A., Almeida, C., Aragão, L., Barlow, J., Bilbao, B., Brando, P., Bynoe, P., Finer, M., Flores, B. M., Jenkins, C. N., Silva, C., Smith, C., Souza, C., García-Vilacorta, R., & Nascimento, N. (2024). Drivers and ecological impacts of deforestation and forest degradation in the Amazon. *Acta Amazonica*, 54(spe1), e54es22342. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202203420>
- Cao, R., Wang, H., Zhu, Y., & Yi, M. (2025). The synergistic effect of species diversity and functional diversity in subtropical naturally regenerating forests promotes environmental adaptability of biomass accumulation. *Trees, Forests and People*, 22, 101037. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2025.101037>
- Carneiro, F. da S., et al. (2020). Densidade da madeira de espécies florestais de quatro áreas experimentais da Amazônia oriental brasileira. *Atena Editora*. <https://doi.org/10.22533/at.ed.339200405>
- Chaturvedi, R. K., Pandey, S. K., Tripathi, A., Goparaju, L., Raghubanshi, A. S., & Singh, J. S. (2023). Variations in the plasticity of functional traits indicate the differential impacts of abiotic and biotic factors on the structure and growth of trees in tropical dry forest fragments. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1181293. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1181293>

- doi.org/10.3389/FPLS.2023.1181293/
REFERENCE
- 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. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chávez, J., & Sabogal, C. (2019). Restoring degraded forest land with native tree species: The experience of “Bosques Amazónicos” in Ucayali, Peru. *Forests*, 10(10), 851. <https://doi.org/10.3390/f10100851>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>
- Cruz, M., Pradel, W., Juarez, H., Hualla, V., & Suarez, V. (2023). Deforestation Dynamics in Peru. A Comprehensive Review of Land Use, Food Systems, and Socio-Economic Drivers. *Comprehensive Review of Land Use*. <https://doi.org/10.4160/CIP.2023.12.007>
- da Silva Junior, C. A., Lima, M., Teodoro, P. E., de Oliveira-Júnior, J. F., Rossi, F. S., Funatsu, B. M., Butturi, W., Lourençoni, T., Kraeski, A., Pelissari, T. D., Moratelli, F. A., Arvor, D., Luz, I. M. D. S., Teodoro, L. P. R., Dubreuil, V., & Teixeira, V. M. (2022). Fires Drive Long-Term Environmental Degradation in the Amazon Basin. *Remote Sensing*, 14(2), 338. <https://doi.org/10.3390/RS14020338/S1>
- de Sousa Lopes, L. S., Pauletto, D., Gomes, E. S. C., da Silva, Á. F., de Sousa Oliveira, T. G., da Silva, J. A. G., Baloneque, D. D., & Martorano, L. G. (2023). Dendrometric relationships and biomass in commercial plantations of *Dipteryx* spp. in the eastern Amazon. *Forests*, 14(11), 2167. <https://doi.org/10.3390/f14112167>
- Di Sacco, A., Hardwick, K. A., Blakesley, D., Brancalion, P. H. S., Breman, E., Rebola, L. C., Chomba, S., Dixon, K., Elliott, S., Ruyonga, G., Shaw, K., Smith, P., Smith, R. J., & Antonelli, A. (2021). Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits. *Global Change Biology*, 27(7), 1328–1348. <https://doi.org/10.1111/gcb.15498>
- Espejo, J. C., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L. E., & Silman, M. (2018). Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sensing 2018, Vol. 10, Page 1903*, 10(12), 1903. <https://doi.org/10.3390/RS10121903>
- Flores BendeZú, Y. (2019). Fichas técnicas para plantaciones con especies nativas en zonas de selva baja. INIA & GIZ. <https://repositorio.inia.gob.pe/items/84b8a228-66fb-4ecd-bb48-9c1bb19774c5>
- Flores BendeZú, Y. (2025a). Crecimiento del “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonía peruana. *Revista Forestal Del Perú*, 39(2), 238–255. <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1829>
- Flores BendeZú, Y. (2025b). Desarrollo y validación de modelos no lineales de altura-diámetro para cuatro especies de la Amazonia peruana. *Revista Forestal Del Perú*, 40(1), 123–139. <https://doi.org/10.21704/rfp.v40i1.2243>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555–564. <https://doi.org/10.1038/S41586-023->

06970-0;TECHMETA

- Garate-Quispe, J., Herrera-Machaca, M., Pareja Auquipata, V., Alarcón Aguirre, G., Baez Quispe, S., & Carpio-Vargas, E. E. (2024). Resilience of Aboveground Biomass of Secondary Forests Following the Abandonment of Gold Mining Activity in the Southeastern Peruvian Amazon. *Diversity*, 16(4), 233. <https://doi.org/10.3390/d16040233>
- Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., & Cerre, J. C. (2017). Tropical timber atlas: Technological characteristics and uses. *Éditions Quæ*.
- Glinskis, E. A., & Gutiérrez-Vélez, V. H. (2019). Quantifying and understanding land cover changes by large and small oil palm expansion regimes in the Peruvian Amazon. *Land Use Policy*, 80, 95–106. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.09.032>
- Jones, E., Harden, S., & Crawley, M. J. (2022). *The R book*. John Wiley & Sons.
- Khan, K., Khan, S. N., Ali, A., Khokhar, M. F., & Khan, J. A. (2025). Estimating Aboveground Biomass and Carbon Sequestration in Afforestation Areas Using Optical/SAR Data Fusion and Machine Learning. *Remote Sensing*, 17(5), 934. <https://doi.org/10.3390/RS17050934/S1>
- Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., ... Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABP8622>
- Loureiro, A. A., & Lisboa, P. L. B. (1979). Anatomia do lenho de seis espécies de *Ormosia* (Leguminosae) da Amazônia. *Acta Amazonica*, 9, 731–746.
- Luize, B. G., Tuomisto, H., Ekelschot, R., Dexter, K. G., Amaral, I. L. do, Coelho, L. de S., Matos, F. D. de A., Lima Filho, D. de A., Salomão, R. P., Wittmann, F., Castilho, C. V., Carim, M. de J. V., Guevara, J. E., Phillips, O. L., Magnusson, W. E., Sabatier, D., Cardenas Revilla, J. D., Molino, J.-F., Irupe, M. V., ... ter Steege, H. (2024). The biogeography of the Amazonian tree flora. *Communications Biology*, 7(1), 1240. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06937-5>
- Macedo, J. J. (2015). Crecimiento y productividad de tres especies del género *Handroantus* sp. en plantaciones a campo abierto en la estación experimental Alexander Von Humboldt, Ucayali - Perú [Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. <http://repositorio.unapikitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4292>
- Melo da Silva, C., Elias, F., Oliveira do Nascimento, R., & Ferreira, J. (2023). The potential for forest landscape restoration in the Amazon: State of the art of restoration strategies. *Restoration Ecology*, 31(7), e13955. <https://doi.org/10.1111/rec.13955>
- Monter-Pozos, A., & González-Estrada, E. (2024). On testing the skew normal distribution by using Shapiro–Wilk test. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 440, 115649. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115649>
- Nave, L. E., Walters, B. F., Hofmeister, K. L., Perry, C. H., Mishra, U., Domke, G. M., & Swanston, C. W. (2018). The role of reforestation in carbon sequestration. *New Forests*, 50(1), 115–137. <https://doi.org/10.1007/S11056-018-9655-3>
- Oliveira, R. S., Costa, F. R. C., van Baalen, E., de Jonge, A., Bittencourt, P. R., Almanza, Y., Barros, F. de V., Cordoba, E. C., Fagundes, M. V., Garcia, S., Guimaraes, Z. T. M., Hertel, M., Schietti, J., Rodrigues-Souza, J., & Poorter, L. (2019). Embolism resistance drives the distribution of Amazonian rainforest tree species along

- hydro-topographic gradients. *New Phytologist*, 221(3), 1457–1465. <https://doi.org/10.1111/NPH.15463>
- Perez Robalino, M. B. (2023). Análisis comparativo del módulo de elasticidad y la densidad básica por dos métodos de evaluación, de la madera *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke (Shihuahuaco), Pucallpa – Ucayali [Tesis de licenciatura, *Universidad Nacional de Ucayali*].
- Posit Software. (2024). RStudio: Integrated development environment for R (Versión 2024.09.0+375) [Software]. <https://posit.co/>
- Ramírez Altamirano, M. A. (2000). Evaluación de nueve líneas de algodón áspero (*Gossypium barbadense* L.) linaje blanco en un ultisol de Von Humboldt. [Tesis de grado, *Universidad Nacional de Ucayali*]. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Pucallpa, Perú.
- Rengifo, C. P. (2018). Influencia de la temperatura y la precipitación en la fenología de 8 especies forestales desde el año 2012 al 2017 en el anexo experimental Alexander Von Humboldt, Ucayali – Perú (Tesis de licenciatura, *Universidad Nacional de Ucayali*). 100 pp.
- Rolim, S. G., & Piotto, D. (2024). Diameter growth models and performance of 100 tropical tree species in silvicultural trials in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 569, 122202. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122202>
- Romero, F. M. B., de Nazaré Oliveira Novais, T., Jacovine, L. A. G., Bezerra, E. B., de Castro Lopes, R. B., de Holanda, J. S., Reyna, E. F., & Fearnside, P. M. (2024). Wood basic density in large trees: Impacts on biomass estimates in the southwestern Brazilian Amazon. *Forests*, 15(5), 734. <https://doi.org/10.3390/f15050734>
- Romero, F. M. B., Jacovine, L. A. G., Carneiro, A. d. C. O., Chaves, M. V. G. S., Bezerra, E. B., Lafuente, J. P. S., da Rocha, S. J. S. S., Lopes, M. T. G., & Fearnside, P. M. (2025). Carbon Content of Amazonian Commercial Tree Boles: Implications for Forest Management. *Sustainability*, 17(7), 2960. <https://doi.org/10.3390/su17072960>
- Rosado, L. S. S., Modolo, G. S., Guimarães, Z. T. M., Ferreira dos Santos, V. A. H., Rosado, S. I. P., & Ferreira, M. J. (2023). Short-term responses of native tree species to site conditions after mining in the Central Amazon. *Ecological Engineering*, 192, 106992. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106992>
- Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1989). Statistical methods (8th ed.). Iowa State University Press. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2017). *The Soil Survey Manual*. (<https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soil/citing-our-databases>)
- Toledo, J. J., Castilho, C. V., Magnusson, W. E., & Nascimento, H. E. M. (2017). Soil controls biomass and dynamics of an Amazonian forest through the shifting of species and traits. *Revista Brasileira de Botânica*, 40(2), 451–461. <https://doi.org/10.1007/S40415-016-0351-2/METRICS>
- Ugalde, L. (2000). Guía para el establecimiento y medición de parcelas para el monitoreo y evaluación del crecimiento de árboles en investigación y en programas de reforestación con la metodología del sistema MIRA (p. 16). *Turrialba*, Costa Rica: CATIE.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). Mixed effects models and extensions in ecology with R (Vol. 574, p. 574). New York: *Springer*.