



TOMOGRAFÍA ACÚSTICA, UNA TECNOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE ÁRBOLES SEMILLEROS EN LA AMAZONÍA PERUANA

Juan Rodrigo BASELLO-VILLANUEVA^{1*}, Andrés FERNÁNDEZ-SANDOVAL¹, Arturo Tomas MACEDO-RAMÍREZ¹, Evelin Judith SALAZAR-HINOSTROZA², Sheyla Yanett CHUMBIMUNE-VIVANCO³, Jorge Enrique PÉREZ-ARIRAMA¹, Geomar VALLEJOS-TORRES⁴; Ana Márcia MACEDO LADEIRA CARVALHO⁵

¹ Estación Experimental Agraria San Roque, Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. San Juan Bautista, Maynas, Loreto, Perú.

² Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. La Molina, Lima, Perú.

³ Estación Experimental Agraria Vista Florida, Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. Ferreñafe, Chiclayo, Perú.

⁴ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, San Martín, Perú.

⁵ Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Geras, Brazil.

* Correo electrónico: jrbasellyv@gmail.com

RESUMEN

La forestación y reforestación ayudan a frenar la deforestación; pero las plantaciones en el Perú muestran baja productividad debido al uso de semillas de calidad genética deficiente. La selección en masa es la primera fase de los programas de mejoramiento, evaluando características dasométricas y morfométricas. Sin embargo, la evaluación de la sanidad interna se evalúa con técnicas poco precisas. El estudio tuvo por objetivo demostrar que la tomografía acústica es clave para seleccionar de árboles semilleros en la Amazonía peruana. Se evaluaron las especies *Anaueria brasiliensis*, *Aspidosperma parvifolium*, *Bertholletia excelsa*, *Cedrelinga cateniformis*, *Dipteryx micrantha*, *Nectandra cuspidata* y *Schefflera morototoni*. Se utilizó el tomógrafo acústico para evaluar la sanidad, se analizó la incidencia por especie y el porcentaje de afectación mediante la prueba de Kruskal-Wallis; y se evaluó la asociación de la sanidad con variables dasométricas.

Anaueria brasiliensis presentó la mayor afectación (45,4%), mientras que *Bertholletia excelsa* y *Cedrelinga cateniformis* mostraron los menores porcentajes (0,9%). Existió diferencias significativas para el porcentaje de afectación de los árboles candidatos ($p < 0,05$) y presentaron fuertes asociaciones positivas con las variables dasométricas. Este estudio confirma que la tomografía acústica es fundamental en la selección de árboles semilleros en la amazonía peruana.

PALABRAS CLAVE: análisis multivariado, biodiversidad, deforestación, genética forestal, tomogramas.

ACOUSTIC TOMOGRAPHY, A TECHNOLOGY FOR SEED TREE SELECTION IN THE PERUVIAN AMAZON

ABSTRACT

Afforestation and reforestation help to slow deforestation, but plantations in Peru show low productivity due to the use of seeds of poor genetic quality. Mass selection is the first phase of breeding programs, evaluating dasometric and morphometric characteristics. However, the evaluation of internal health is assessed with imprecise techniques. The aim of this study was to demonstrate that acoustic tomography is key to the selection of seed trees in the Peruvian Amazon. The species *Anaueria brasiliensis*, *Aspidosperma parvifolium*, *Bertholletia excelsa*, *Cedrelinga cateniformis*, *Dipteryx micrantha*, *Nectandra cuspidata* and *Schefflera morototoni* were evaluated. The acoustic tomograph was used to evaluate health, the incidence by species and the percentage of affectation were analyzed using the Kruskal-Wallis test; and the association of health with dasometric variables was evaluated. *Anaueria brasiliensis* showed the highest incidence (45.4%), while *Bertholletia excelsa* and *Cedrelinga cateniformis* showed the lowest percentages (0.9%). There were significant differences for the percentage of candidate trees affected ($p < 0.05$) and they presented strong positive associations with the dasometric variables. This study confirms that acoustic tomography is fundamental in the selection of seed trees in the Peruvian Amazon.

KEYWORDS: Amazonia, multivariate analysis, biodiversity, deforestation, forest genetics, tomograms.

INTRODUCCIÓN

En el Perú, la región Loreto presenta la mayor extensión de bosques amazónicos con 3688 mil ha (SERFOR, 2021a). La región es un foco de deforestación; desde el año 2001 hasta el año 2022 se deforestó 534 mil ha, con pérdidas en el último año de 26 mil ha (GEOBOSQUES, 2024). La forestación y reforestación ayudan a frenar este problema (Cué García *et al.*, 2019); y son alternativas sustentables para cubrir la demanda de madera en el Perú (FAO & CITEMadera, 2018). En las últimas dos décadas se estableció diversas plantaciones comerciales en la Amazonía peruana, hasta el 2018 en Loreto se instaló 23 mil ha (SERFOR, 2019). Las plantaciones en el Perú se caracterizan por una baja productividad, debido al uso de semillas de baja calidad genética (Guariguata *et al.*, 2017). Las principales causas son la escasa investigación en semillas forestales (SERFOR, 2021b).

El éxito o fracaso de una plantación depende de varios factores (Näsi *et al.*, 2018), uno de los más importantes es la calidad genética de la semilla (Cuellar *et al.*, 2016). Utilizar genotipos más productivos es vital para la rentabilidad en las plantaciones (Savill *et al.*, 1997; Ortiz *et al.*, 2016); por lo tanto, es necesario identificar, conservar y utilizar dichos recursos (Kim *et al.*, 2020). La primera fase de los programas de mejoramiento es la selección en masa de árboles semilleros (White *et al.*, 2007); evaluándose características dasométricas (alturas, diámetro, volumen, etc.) y morfométricas (rectitud del fuste, ángulo de ramas, forma de copa, etc.) mediante equipos forestales e inspección visual (Kim *et al.*, 2020). En el caso de árboles amazónicos, existen reportes de pudrición medular (Jarama, 2004; Valderrama Sandoval, 2012), pero la sanidad interna se evalúa con técnicas poco precisas como golpes al fuste o muestreo con barrenos de Pressler (Lombardi *et al.*,

2013); o no se considera en la selección de árboles semilleros.

En el campo de la sanidad forestal, se conocen métodos no destructivos para la identificación de defectos internos (Rojas-Espinoza & Ortíz-Iribarren, 2010). Uno de los métodos más conocidos es el acústico, que utiliza ondas sonoras para determinar las propiedades internas de los fustes (Tarmu *et al.*, 2022). El tomógrafo acústico produce imágenes de la estructura transversal del árbol, conocidos como tomogramas (Karlinasari *et al.*, 2017), a partir de los cuales se pueden detectar huecos, pudrición o deterioro del fuste (Fakopp Enterprise Bt., 2020). Los resultados son muy favorables, permiten tener una vista más completa del tronco y minimizar los daños al individuo en evaluación (Moravčík *et al.*, 2021).

Diversos estudios comparan el rendimiento de la tomografía, como los desarrollados en árboles nativos para detectar daños internos en Asia (Son *et al.*, 2021; Son *et al.*, 2022). En el Perú, las investigaciones son reducidas y las existentes evaluaron la sanidad interna en plantaciones de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (tornillo) y *Simarouba amara* Aubl. (marupa) (Angulo-Ruiz, 2018; Angulo-Ruiz *et al.*, 2021). En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue demostrar que la tomografía acústica es una tecnología fundamental en la selección de árboles semilleros en la Amazonía peruana, planteándose los objetivos específicos: i) evaluar la sanidad interna y ii) analizar la asociación de la sanidad interna con variables dasométricas.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el departamento de Loreto, provincia de Maynas, distrito de San Juan Bautista (Figura 1). Los árboles perte-

necen a un bosque primario remanente, ubicado en el Anexo Experimental “El Dorado”, de la Estación Experimental Agraria San Roque del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), cuyas coordenadas geográficas fueron 3°56'51" de latitud sur y 73°24'47" de longitud oeste, con rango altitudinal de 110 y 180 m s.n.m.

La zona de estudio presenta suelos del tipo ultisol con textura arcillosa a franco arcillosa, con pH extremadamente ácido (Cumari Laulate *et al.*, 2020). El clima es muy lluvioso, cálido y muy húmedo durante todo el año, con temperaturas mínima, promedio y máxima de 23, 27,6 y 32°C, respectivamente; con precipitación anual de 2766 mm (SENAMHI, 2020). La zona de vida

es bosque muy húmedo (Aybar-Camacho, 2017), que se distingue por formaciones boscosas que crecen sobre terrazas imperfectamente drenadas.

Las especies evaluadas fueron *Anaueria brasiliensis* Kosterm. (añuje rumo), *Aspidosperma parvifolium* A.DC.(quillobordon), *Bertholletia excelsa* Bonpl. (castaña), *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo), *Dipteryx micrantha* Harms (chacapilla), *Nectandra cuspidata* Nees & Mart. (moena amarilla) y *Schefflera morototoni* Aubl. Maguire, Steyerl. & Frodin (aceite caspi). De cada especie se seleccionaron nueve árboles candidatos a semilleros, considerándose variables morfológicas como la rectitud del fuste, grosor de ramas, ángulo de inserción de ramas y granos de inserción. Así

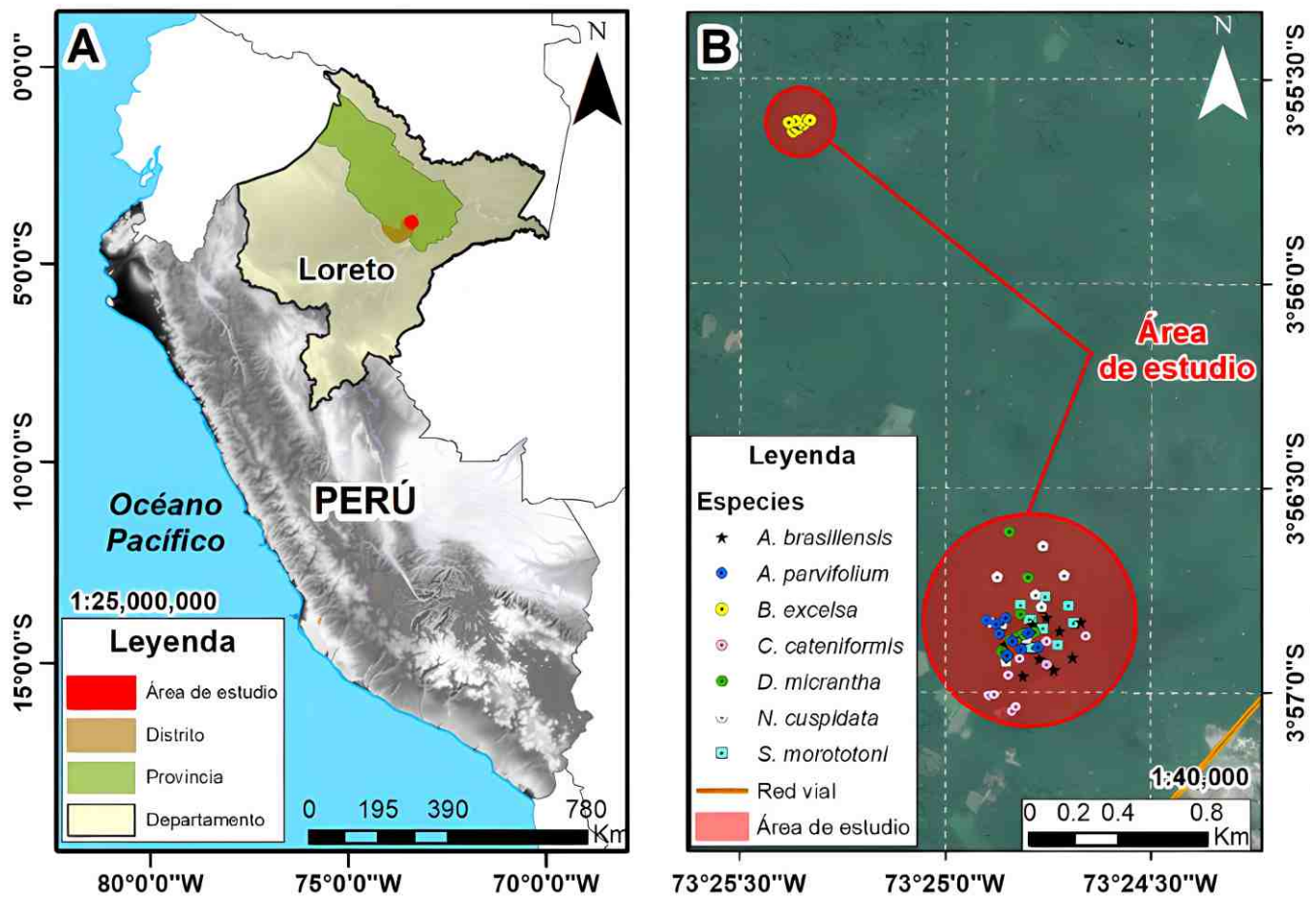


Figura 1. Ubicación del área de estudio. A. Departamento de Loreto, provincia de Maynas, distrito de San Juan Bautista; B. Dispersión de árboles candidatos a semilleros.

mismo, se evaluó variables dasométricas como el diámetro a la altura del pecho a 1,3 m (DAP, cm), altura comercial (HC, m), altura total (HT, m) y volumen comercial (VC, m³). El VC se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$VC = 0,7854*(DAP/100)^2*HC*f$$

El factor de forma (f) se obtuvo de Ojeda (1983) y SERFOR (2021a). Los árboles presentaron en promedio DAPs de 43,3 cm (*B. excelsa*) a 85,89 cm (*A. brasiliensis*) (Tabla 1).

COLECTA DE DATOS

La sanidad interna se evaluó mediante el Tomógrafo forestal acústico "ArborSonic 3D", equipo que se basa en evaluar el tiempo que demoran las ondas sonoras en llegar entre sensores (Fakopp Enterprise Bt., 2015). Para cada individuo se determinó la sanidad interna a tres alturas del fuste (capas), a los 0,5, 1,0 y 1,5 metros sobre el nivel del suelo. La metodología usada para evaluar la sanidad fue la realizada por Angulo-Ruiz *et al.* (2021). Se usaron 10 sensores, instalados equidistantes de forma perpendicular al fuste (90°) y orientados hacia la médula en un plano horizontal.

ANÁLISIS DE DATOS

Los archivos ArborSonic 3D Project file fueron abiertos en el programa ArborSonic 3D v5.3.125 (Fakopp Enterprise Bt., 2015), se ingresó a la pestaña "biomecánica" y se obtuvo el "área afectada por pudrición" de las capas evaluadas (%).

El análisis estadístico se realizó en el Programa R Studio (R Core Team, 2020). La sanidad interna se evaluó con la incidencia por especie (%), mediante la fórmula usada por Pacheco Gómez *et al.* (2022):

$$Incidencia (\%) = (\text{Número de árboles afectados} / \text{Número total de árboles evaluados}) * 100$$

Además, se analizó el porcentaje de afectación (A) por especies y capas de los árboles candidatos. La comparación se efectuó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis a un 95% de probabilidad ($p < 0,05$), con la función `Kruskal.test` de R; debido al no cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza (Pruebas de Shapiro Wilk y Barlett, $p < 0,05$).

La asociación de la sanidad interna con variables dasométricas se analizó mediante Análisis de Componentes Principales (ACP), se empleó los paquetes `FactoMineR` y `Factoextra`; así mismo, se evaluó el grado de correlación (ρ), mediante la prueba no paramétrica de Spearman de la función `cor` del programa R ($p < 0,05$).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de variables dasométricas de árboles candidatos a semilleros en la Amazonía peruana, Loreto, Perú. Media \pm Desviación estándar.

Variable	<i>A. brasiliensis</i>	<i>A. parvifolium</i>	<i>B. excelsa</i>	<i>C. cateniformis</i>	<i>D. micrantha</i>	<i>N. cuspidata</i>	<i>S. morototoni</i>
DAP (cm)	85,89 $\pm 26,08$	51,16 $\pm 8,57$	43,51 $\pm 5,89$	56,23 $\pm 10,78$	50,26 $\pm 17,62$	66,92 $\pm 21,09$	47,14 $\pm 7,28$
HC (m)	14,10 $\pm 2,60$	12,16 $\pm 3,29$	13,43 $\pm 1,64$	12,34 $\pm 3,15$	11,67 $\pm 1,72$	10,97 $\pm 2,60$	13,20 $\pm 1,84$
HT (m)	22,44 $\pm 1,81$	19,44 $\pm 4,45$	21,56 $\pm 1,24$	19,56 $\pm 3,24$	18,67 $\pm 1,41$	17,44 $\pm 2,79$	21,11 $\pm 1,27$
VC (m ³)	4,92 $\pm 2,84$	1,68 $\pm 0,73$	1,25 $\pm 0,40$	2,03 $\pm 1,02$	1,73 $\pm 1,43$	2,09 $\pm 1,19$	1,56 $\pm 0,59$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SANIDAD INTERNA

Anaueria brasiliensis, presentó los mayores niveles de daño, con una incidencia del 96,3% y afectación promedio de 45,4% (Tabla 2). Estos resultados coinciden con los reportes de Valde-rama-Sandoval (2012), quien describe la madera de esta especie como semi-pesada, con una densidad media de $0,58 \text{ g cm}^{-3}$, pero propensa a la pudrición y la formación de huecos en el fuste.

Por el contrario, *Bertholletia excelsa* y *Cedrelinga cateniformis* presentaron la mejor sanidad interna, con incidencias bajas de 25,9% y 22,2% respectivamente, y porcentajes de afectación promedio de 0,9%. La alta resistencia de *B. excelsa* se debe a la presencia de taninos y a la dureza de su corteza, características que sirven como inhibidores de los xilófagos (Salhuana, 1973; Lorenzi, 1992; Franceschi *et al.*, 2005), además de presentar una densidad alta de $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ (Mamani, 2019). Por su parte, la excelente calidad y durabilidad de la madera de *C. cateniformis*, descrita por CPM (2008b), respalda estos resultados.

Aspidosperma parvifolium y *Dipteryx micrantha*, aunque con altas incidencias (92,6% y 88,9%), mostraron afectaciones de 8,7% y 13,1%, respectivamente. Estas especies se caracterizan por ser maderas de densidad alta, *A. parvifolium* y *D. micrantha* presentan densidades básicas de $0,60$ y $0,87 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente (CPM, 2008a; Bustamante *et al.*, 2019); sin embargo, los resultados podrían deberse al estado fisiológico y a la senescencia de los individuos, como señala Ramírez *et al.* (2018), quienes relacionan estos factores con la aparición de lesiones en especies latifoliadas.

Finalmente, especies como *Nectandra cuspidata* y *Schefflera morototoni* tuvieron altas incidencias (92,6% y 89,9%) y afectaciones

promedio de 15,7% y 18,2%, respectivamente. Los resultados obtenidos pueden ser explicados debido a las características de sus maderas, que son livianas a ligeramente pesadas con densidades de $0,32$ y $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ para *S. morototoni* y *N. cuspidata*; correspondientemente (Pulido Rodríguez *et al.*, 2018; Sousa Farias *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos pueden deberse principalmente a la durabilidad de la madera, que está muy asociada a la densidad básica (Vasconez-Lucintuña 2021); pues existen reportes que las especies con densidades bajas son más susceptibles a ser infectadas o infestadas por xilófagos (Interián-Ku *et al.*, 2011); así mismo, pueden deberse al contenido de lignina y extractivos que generan resistencia a la pudrición de la madera (Candelier *et al.* 2023).

Existió diferencias significativas para el porcentaje de afectación de los árboles candidatos ($p < 0,05$), excepto para *A. parvifolium* (Tabla 2). Los individuos de *A. brasiliensis*, *D. micrantha* y *S. morototoni* formaron 4 grupos de sanidad (A, B, C y D). En el caso de *N. cuspidata* se conformó 3 grupos (A, B y C) y para *B. excelsa* y *C. cateniformis* los árboles fueron agrupados en 2 grupos (A y B) (Tabla 2). Los árboles pertenecientes al grupo A presentaron menor afectación interna respecto a los demás.

Los resultados evidencian que la sanidad interna de los árboles amazónicos varía entre individuos como se evidencia principalmente para las especies *A. brasiliensis*, *D. micrantha* y *S. morototoni*, por lo cual es fundamental una correcta evaluación. Con respecto al porcentaje de afectación entre las capas evaluadas por especie, solo *A. parvifolium* presentó diferencias significativas entre ellas ($p < 0,01$); existe mayor porcentaje de afectación en las capas 2 y 3 (Figura 2). Estudios realizados en plantaciones forestales de *Cedrelinga cateniformis* y *Simarouba amara* no presentaron diferencias significativas entre cuatro capas comprendidas entre 0 – 160

Tabla 2. Comparación del porcentaje de afectación entre árboles candidatos a semilleros en la Amazonía peruana, Loreto, Perú. *: $p < 0,05$: significativo; **: $p < 0,01$: altamente significativo; ns: no significativo. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Árbol candidato (AC)	A. <i>brasiliensis</i>		A. <i>parvifolium</i>		B. <i>excelsa</i>		C. <i>cateniformis</i>		D. <i>micrantha</i>		<i>N. cuspidata</i>		S. <i>morototoni</i>	
	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad	Afectación (%)	Grupos de sanidad
1	60,4	BCD	9,5	A	0,0	A	0,0	A	0,0	A	28,2	C	19,5	ABCD
2	65,8	CD	8,2	A	0,0	A	2,0	AB	16,6	BCD	2,3	A	15,0	ABC
3	7,8	AB	1,5	A	0,0	A	0,0	A	14,9	BCD	5,4	AB	0,0	A
4	56,3	ABCD	14,1	A	2,0	AB	0,0	A	2,8	AB	20,9	BC	6,2	AB
5	51,2	ABCD	12,6	A	0,0	A	0,0	A	29,9	D	13,6	ABC	32,9	D
6	70,1	D	9,8	A	0,0	A	0,8	AB	15,7	BCD	1,1	A	31,7	D
7	3,4	A	8,9	A	3,5	B	0,0	A	9,8	ABC	12,9	ABC	9,6	ABC
8	70,9	D	10,3	A	1,2	AB	5,1	B	10,7	ABC	42,4	C	24,1	BCD
9	22,7	ABC	3,4	A	1,1	AB	0,0	A	17,2	CD	14,7	ABC	24,4	CD
Promedio	45,4		8,7		0,9		0,9		13,1		15,7		18,2	
Sig.	**		ns		*		*		**		**		**	

cm, (Angulo-Ruiz 2018; Angulo-Ruiz *et al.*, 2021); resultados similares a los obtenidos en bosque naturales para las especies en estudio a excepción de *A. parvifolium*.

En la mayoría de las especies evaluadas no se evidenciaron diferencias significativas entre las capas evaluadas; por lo cual, para evaluar la sanidad interna de árboles semilleros se recomienda realizar las evaluaciones principalmente en los primeros centímetros de la base del fuste, debido a que esta zona del árbol presenta contacto con el suelo y mayor humedad, y se generan condiciones para el desarrollo de xilófagos (Mendoza-Saucedo, 2018; Angulo-Ruiz *et al.*, 2021).

ASOCIACIÓN DE LA SANIDAD INTERNA CON VARIABLES DASOMÉTRICAS

La variabilidad existente en las características dasométricas y el estado sanitario fue expli-

cada de 80,3 a 93,9%, como se evidencia para *A. parvifolium* y *A. brasiliensis*, respectivamente (Figura 3).

El porcentaje de afectación presentó fuertes asociaciones positivas con las variables dasométricas para *A. brasiliensis*, *D. micrantha* y *S. morototoni* (Figura 3). *A. brasiliensis* tuvo correlaciones significativas y positivas con DAP, HC y HT con ρ de 0,70, 0,66 y 0,68, respectivamente; *D. micrantha* presentó correlaciones significativas con HC y VC; y *S. morototoni* con el VC (Tabla 3). *A. brasiliensis* tuvo correlaciones significativas y positivas con DAP, HC y HT con ρ de 0,70, 0,66 y 0,68, respectivamente; *D. micrantha* presentó correlaciones significativas con HC y VC; y *S. morototoni* con el VC (Tabla 3). Los resultados obtenidos para estas especies concuerdan con los hallazgos de Cárdenas-Rengifo *et al.* (2023), quienes obtuvieron correlaciones positivas y significativas entre la pudrición interna de los árboles con variables

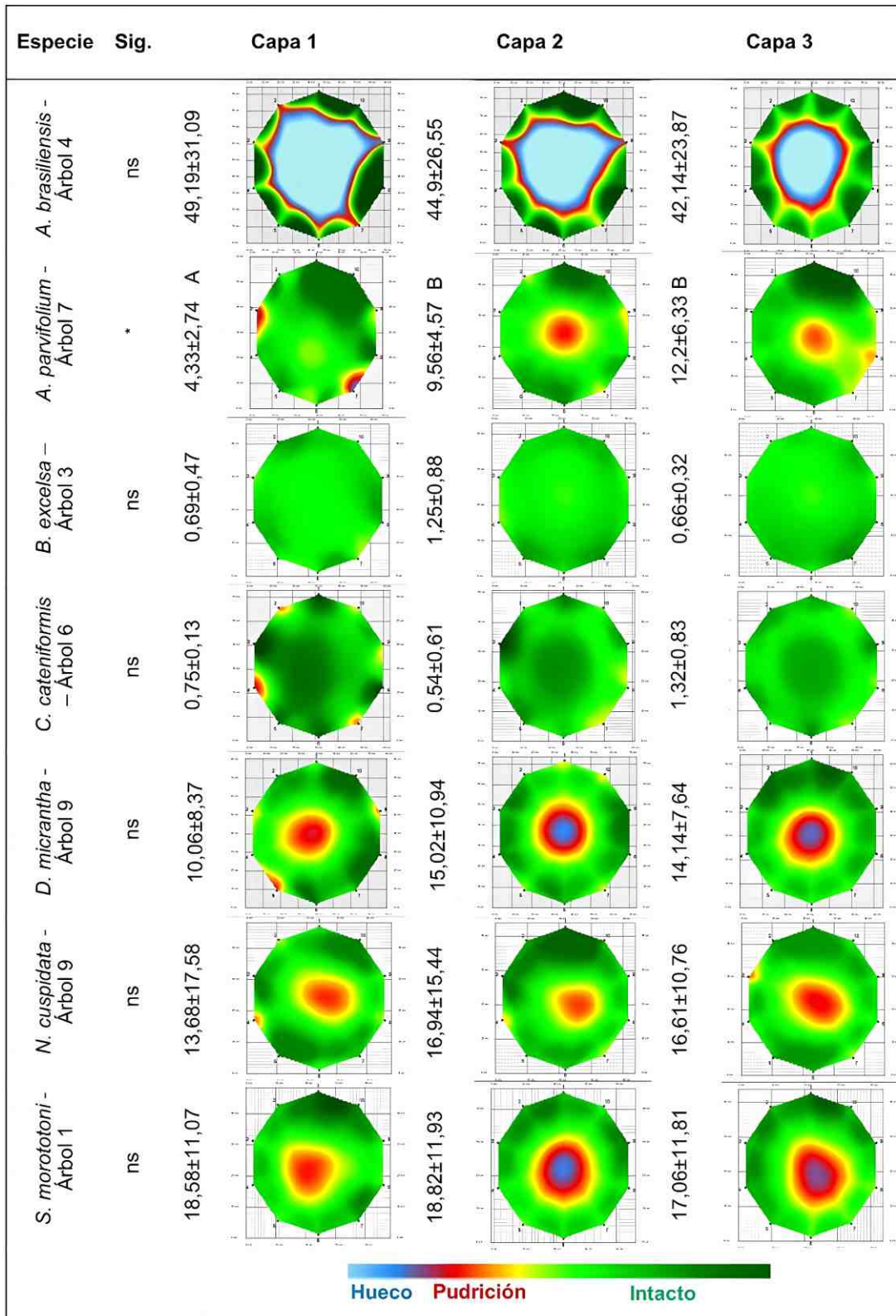


Figura 2. Comparación del porcentaje de afectación entre capas y tomogramas 2D referenciales de árboles candidatos a semilleros en la Amazonía peruana, Loreto, Perú. *: $p < 0,05$; significativo; ns: no significativo. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Kruskal-Wallis.

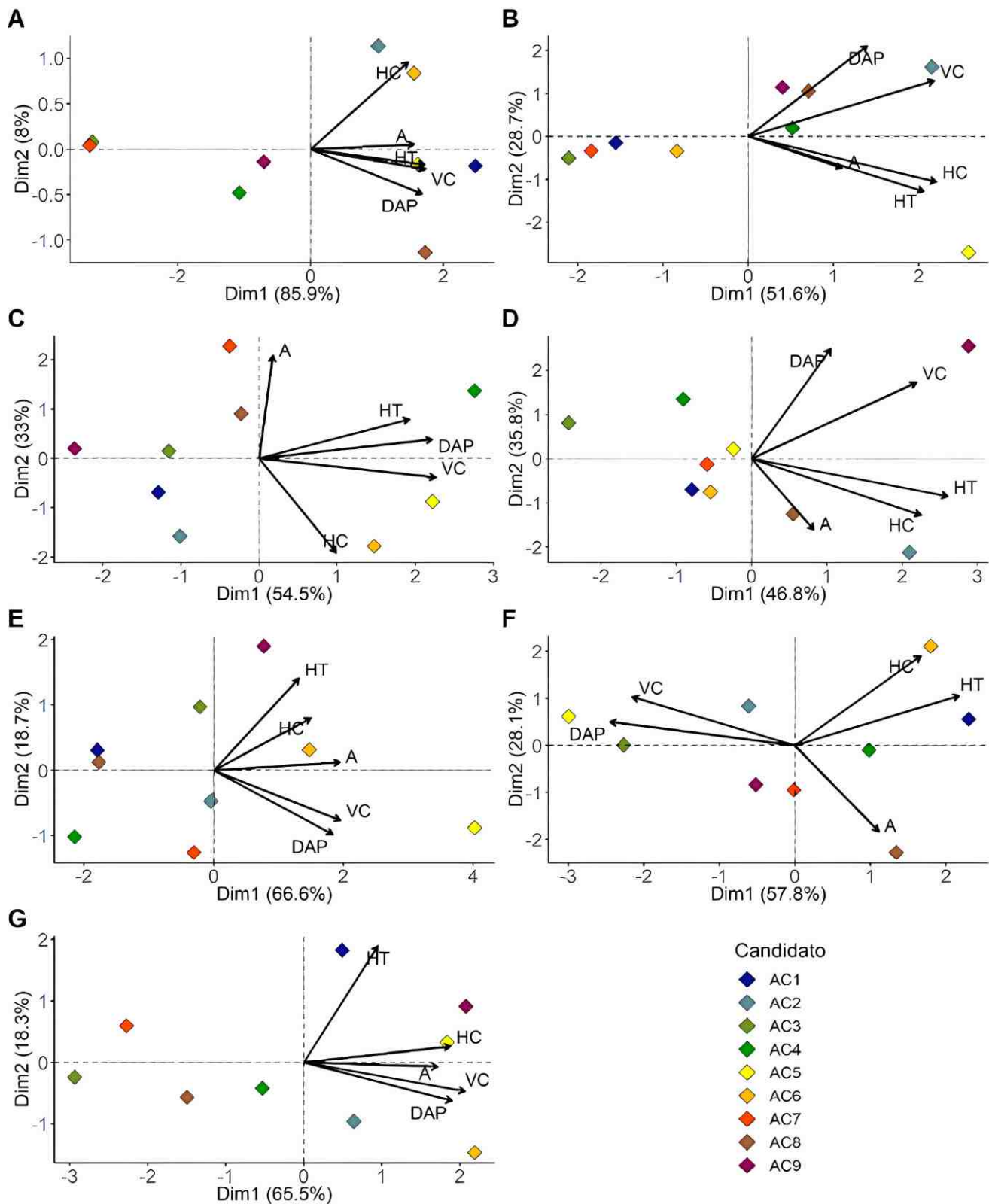


Figura 3. Análisis de Componentes Principales del porcentaje de afectación (A) y variables dasométricas de árboles candidatos a semilleros en la Amazonía peruana, Loreto, Perú. A. *A. brasiliensis*. B. *A. parvifolium*. C. *B. excelsa*. D. *C. cateniformis*. E. *D. micranta*. F. *N. cuspidata*. G. *S. morototoni*.

Tabla 3. Correlación del porcentaje de afectación (A) con variables dasométricas de árboles candidatos a semilleros en la Amazonía peruana, Loreto, Perú. *: $p < 0,05$: significativo; ns: no significativo para la prueba de spearman.

Variable	<i>A. brasiliensis</i>	<i>A. parvifolium</i>	<i>B. excelsa</i>	<i>C. cateniformis</i>	<i>D. micrantha</i>	<i>N. cuspidata</i>	<i>S. morototoni</i>
DAP	0,70*	0,08 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,44 ^{ns}	0,55 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	0,57 ^{ns}
HC	0,66*	0,17 ^{ns}	-0,62 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,72*	-0,10 ^{ns}	0,46 ^{ns}
HT	0,68*	0,31 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,26 ^{ns}
VC	0,63 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,65*	-0,43 ^{ns}	0,72*

dasométricas como DAP, HT y VC. Los mismos autores encontraron que la pudrición medular estuvo principalmente influenciada por la edad con ρ de 0,858; pudiéndose deber al grado de madurez de los individuos, que por lo general cuando presenta mayores dimensiones son más susceptibles por la senescencia (Restrepo *et al.*, 2015). Por lo tanto, se evidencia que cuando los árboles de estas especies presentan mayores dimensiones son más susceptibles a tener un fuste con afectación.

La selección de árboles de alto rendimiento es el primer paso para el mejoramiento genético (White *et al.*, 2007), considerándose principalmente características fenotípicas externas (Fabián-Plesníková *et al.*, 2020). En el presente estudio se evidencia que la tomografía acústica es fundamental para la selección de árboles semilleros en especies amazónicas, pues permite evaluar con mayor precisión el estado interno del fuste, pues existe variación entre individuos de la misma especie para este criterio de selección. La variación del estado sanitario interno del fuste también se puede atribuir a las condiciones climáticas de la Amazonía, como la lluvia, que genera susceptibilidad a hongos, insectos y otros patógenos (Quinto Mosquera *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

La tomografía acústica es fundamental en la selección de árboles semilleros amazónicos; considerando que existen especies con alta variación de la sanidad interna entre sus indivi-

duos. La susceptibilidad de afectaciones del fuste puede estar influenciada por variables intrínsecas de las especies como las características de la madera y el estado fisiológico; así como a condiciones climáticas. *A. brasiliensis* presentó en promedio los mayores porcentajes de afectación (45,4%), por otro lado, *B. excelsa* y *C. cateniformis*, presentaron los menores porcentajes (0,9%).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Presupuestal 0121 Desarrollo de Paquetes Tecnológicos Agropecuarios. Así como a los ingenieros Miriam Ramos León y Víctor Raúl Vargas Saboya, por el apoyo con los trabajos en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo-Ruiz, W. 2018. *Estudio de Sanidad Forestal mediante Técnicas Acústicas no Destructiva de una Plantación Forestal "Tornillo" proveniente de la Región Loreto*. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima. 9pp.
- Angulo-Ruiz, W.E.; Fasabi-Pashanasi, H.; Rengifo-Pérez, C.P.; Valdivia-Marquez, L.N. 2021. Técnica no destructiva basada en tomografía acústica para la identificación de defectos internos en árboles. *Scientia Agropecuaria*, 12(1): 65-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.008>
- Aybar-Camacho, C.; Lavado-Casimiro, W;

- Sabino, E.; Ramírez, S.; Huerta, J.; Felipe-Obando, O. 2017. *Atlas de zonas de vida del Perú – Guía Explicativa*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. 27 pp.
- Bustamante, K.; Chavesta, M.; Gonzales, H. 2019. Caracterización anatómica de la madera y carbón de cinco especies leñosas para su identificación. *Revista Forestal del Perú*, 34(2): 144-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v34i2.1326>
- Candelier, K., Gerard, J., Thevenon, M.-F., & Thibaut, B. 2023. Enquête sur la résistance naturelle à la pourriture de cinq cents essences de bois tropicaux. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 358, 53–65. <https://doi.org/10.19182/bft2023.358.a37353>
- Cárdenas-Rengifo, G. P., Baselly-Villanueva, J. R., Chumbimune-Vivanco, S. Y., Macedo-Ramírez, A. T., Salazar, E., Minaya, B., Quintana, S., Cabudivo, A., Palma, S. S. A., Álvarez-Álvarez, P., & Ocaña-Reyes, J. A. 2024. Using Acoustic Tomography to Model Wood Deterioration in *Cedrelinga cateniformis* Ducke in the Peruvian Amazon. *Forests*, 15(5), 778. <https://doi.org/10.3390/f15050778>
- CPM. 2008a. *Compendio de información técnica de 32 especies forestales: Tomo II*. Confederación Peruana de la Madera, Lima. 73 pp.
- CPM. 2008b. *Compendio de información técnica de 32 especies forestales. Tomo I*. Confederación Peruana de la Madera, Lima. 73 pp.
- Cué García, J. L.; Añazco, M. J.; Paredes, O. H. 2019. Producción y conservación de semillas forestales: situación actual y perspectivas en Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(3): 365-376.
- Cuellar, J.; Ugarte, J.; Vilcapoma, E. 2016. *Las Semillas Forestales en el Perú; Desafíos y Oportunidades*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. 76 pp.
- Cumari Laulate, E.; Urrelo Correa, J. I.; Gonzales Vega, R.; Pinedo Jimenez, J.; Vásquez Bardales, J. 2020. Comportamiento agronómico de *Oryza sativa* L. (arroz) y *Manihot esculenta* Crantz (yuca) en dos localidades de siembra en Loreto, Perú. *Folia Amazónica*, 29(2): 267-278. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v29i2.526>
- Fabián-Plesníková I.; Sáenz-Romero, C.; Cruz de León, J.; Martínez-Trujillo, M.; Sánchez-Vargas, N. M. 2020. Parámetros genéticos de caracteres de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus oocarpa*. *Madera y Bosques*, 26(3): e2632014. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632014>
- Fakopp Enterprise Bt. 2015. Manual del usuario v5.1.30. *ArborSonic 3D*, Hungría. 23 pp.
- Fakopp Enterprise Bt. 2020. Manual v 6.2 for the ArborSonic 3D acoustic tomograph. *ArborSonic 3D*, Hungría. 63 pp.
- FAO; CITEMadera. 2018. *La Industria de la Madera en el Perú: Identificación de las barreras y oportunidades para el comercio interno de productos responsables de madera, provenientes de fuentes sostenibles y legales en las MIPYMES del Perú*. FAO y CITEMadera. 140 pp.
- Franceschi, V. R.; Krokene, P.; Krekling, T. 2005. Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. *New Phytologist*, 167(2): 353-376. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01436.x>
- GEOBOSQUES. 2024. *Bosque y pérdida de bosque*. (<https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>). Acceso: 13/04/2024.
- Guariguata, M.R.; Arce, J.; Ammour, T.; Capella, J.L. 2017. *Las plantaciones forestales en Perú: reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro (Volumen 169)*. CIFOR. 29 pp. DOI: <https://doi.org/10.17528/cifor/006461>

- Interián-Ku, V.M.; Borja de la Rosa, M.A.; Valdez-Hernández, J.I.; García-Moya, E., Romero-Manzanares, A.; Vaquera-Huerta, H. 2011. Características anatómicas y propiedades físicas de la madera de *Caesalpinia gaumeri* Greenm en Dzan, Yucatán. *Madera y Bosques*, 17(1): 23-36.
- Jarama, L. 2004. *Evaluación de la enfermedad «Pudrición medular» de la especie Cedrelinga catenaeformis, Ducke "tornillo" en plantaciones forestales del Centro de Investigaciones Jenaro Herrera (CIJH)*. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Iquitos, Perú. 181 pp.
- Karlinasari, L.; Lestari, A.; Nababan, M.; Siregar, I.; Nandika, D. 2017. *Assessment of urban tree condition using Sonic tomography technology*. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 203: 12-30. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/203/1/012030>
- Kim, I. S.; Lee, K. M.; Shim, D.; Kim, J. J.; Kang, H. I. 2020. Plus Tree Selection of *Quercus salicina* Blume and *Q. glauca* Thunb. and Its Implications in Evergreen Oaks Breeding in Korea. *Forests*, 11(7): 735. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11070735>
- León, J. 2000. *“Botánica de los cultivos tropicales”*. (3ª ed.). Editorial Agroamericana, Costa Rica.
- Lombardi, I.; Garnica, C.; Carranza, J.; Ortiz, H.; Rodríguez, C.; Cuba, K.; Huamaní, J. 2013. *Manual para la evaluación de árboles semilleros y la regeneración de Caoba (Swietenia Macrophylla King.) y Cedro (Cedrela spp.)*. MINAM, Lima, Perú. 54 pp.
- Lorenzi, H. 1992. *“Arvores Brasileiras”*. Editorial Plantarum, Brasil. 352 pp.
- Mamani M, N. 2019. *Anatomía de la corteza de tres especies forestales del bosque de terraza alta de la región de Madre de Dios*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, Madre de Dios, Perú. 76 pp.
- Mendoza-Saucedo, G. 2018. *Uso de métodos no destructivos para determinar el riesgo de caída de árboles urbanos, en el Parque de las Leyendas*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Lima, Perú. 239 pp.
- Moravčík, L.; Vincúr, R; Rózová, Z. 2021. Analysis of the Static Behavior of a Single Tree on a Finite Element Model. *Plants*, 10(7): 1284. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10071284>
- Näsi, R.; Honkavaara, E.; Blomqvist, M.; Paivi, L.; Hakala, T.; Viljanen, N.; Tuula, K.; Holopainen, M. 2018. Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30: 72-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.010>
- Ojeda, W. 1983. Factor de forma preliminar para seis familias de especies forestales tropicales. *Revista forestal del Perú*, 11(1-2): 95-100.
- Ortiz Muñoz, E.; Acosta Hernández, C. C.; Linares Márquez, P.; Morales Romero, Z.; Rebolledo Camacho, V. 2016. Selección de árboles semilleros de *Juglans pyriformis* Liebm. en poblaciones naturales de Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38): 43-58.
- Pacheco Gómez, T.; Cordova Horna, S.; Del Castillo Mozombite, D.M.;1, Rios Zumaeta, R.; Cabanillas Oliva, E.G.; Pinedo Jiménez, J.; Angulo Ruiz, P.; Vásquez bardales, J. 2022. Supervivencia e insectos plaga de especies forestales y frutales en puerto almendra, región Loreto, Perú. *Folia amazónica*, 31:(2) 209-226. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v31i2.563209>
- Pulido Rodríguez, E. N.; Otavo Rodríguez, E.; Solórzano Gutiérrez, J. F.; Mogollón Albarracín, S. A.; Quintero Gómez, A.; Amado Ariza, S. M.;

- Sebastián Suárez Díaz, S.; Ariza Jimenez, J. C. 2018. *Propiedades físico-mecánicas y uso de 17 especies forestales en la Amazonia Colombiana*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. 101 pp.
- Quinto Mosquera, H.; Rengifo Ibargüen, R.; Ramos Palacios, YA. 2009. Mortalidad y reclutamiento de árboles en un bosque pluvial tropical de Chocó (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1): 4855-4868.
- Ramírez, C., Álvarez, M., San Martín, C., Carrasco, E., Vidal, O., Toledo, G., ... & Veste, M. 2018. El cambio climático como causa de daños en bosques chilenos. *Chloris chilensis*.
- R Core Team. 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<https://www.r-project.org>). Acceso: 24/05/2023.
- Restrepo, H.; Moreno, F.; Hoyos, C. 2015. Incidencia del deterioro progresivo del arbolado urbano en el valle de Aburrá, Colombia. *Colombia Forestal*, 18(2): 225-240. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.2.a04>
- Rojas-Espinoza, G.; Ortíz-Iribarren, O. 2010. Identificación del cilindro nudoso en imágenes TC de trozas posadas de *Pinus radiata* utilizando redes neuronales artificiales. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 12(3): 229-239. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2010000300007>
- Salhuana, J. 1973. *Exploración y comercialización de la Castaña en Madre de Dios*. En: Dirección General Forestal y Caza (Nº 30). Ministerio de Agricultura, Perú. 85 pp.
- Savill, P.; Evans, J.; Auclair, D.; Falck, J.; 1997. *Plantation Silviculture in Europe*. University Press, Oxford.
- SENAMHI. 2020. *Estación Puerto Almendras. Datos hidrometeorológicos del caserío Puerto Almendras, Provincias de Maynas, región Loreto*. Datos hidrometeorológicos números DH-01-2020 hasta DH-12-2020.
- SERFOR. 2021a. *Informe del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre para el departamento de Loreto - Panel 1 y 2*. SERFOR, Lima. 322 pp.
- SERFOR. 2021b. *Estrategia para la promoción de plantaciones forestales comerciales 2021 - 2050*. SERFOR, Lima. 114 pp.
- SERFOR. 2019. *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2018*. SERFOR, Lima. 187 pp.
- Son, J.; Lee, G.; Shin, J. 2022. Noninvasive Sonic Tomography for Detecting Internal Defects in Old, Large Oriental White Oak in Cultural Heritage Areas. *Forests*, 13(5): 638. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13050638>
- Son, J.; Lee, G.; Shin, J. 2021. Reliability of Noninvasive Sonic Tomography for the Detection of Internal Defects in Old, Large Trees of *Abies holophylla* Maxim. *Forests*, 12(8): 1131. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12081131>
- Sousa Farias, H. L.; Rodrigues Silva, W.; de Oliveira Perdiz, R.; Camurça Citó, A.; da Silva Carvalho, L.C.; Imbrozio Barbosa, R. 2020. Dataset on wood density of trees in ecotone forests in Northern Brazilian Amazonia. *Data in Brief*, 30: 105378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105378>
- Tarmu, T.; Kiviste, A.; Näkk, A.; Sims, A.; Laarmann, D. 2022. The Application of Sonic Tomography (PiCUS 3 Sonic Tomograph) to Detect and Quantify Hidden Wood Decay in Managed Norway Spruce Stands. *Forests* 13(8): 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081260>.
- Valderrama Sandoval, D. E. 2012. *Estado de la masa remanente de un bosque aprovechado con manejo forestal en la comunidad nativa de Santa Mercedes, Loreto - Perú*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la

- Amazonia Peruana, Facultad de Ciencias Forestales, Iquitos, Perú. 54 pp.
- Vasconez Lucintuña, D. K. 2021. *Durabilidad natural de la madera de dos especies forestales a la acción de un hongo xilófago con pruebas aceleradas en laboratorio*. Tesis de pre-grado, Escuela Politécnica Superior de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Riobamba, Ecuador. 68pp.
- White, T.L.; Adams, W.T.; Neal, D.B. 2007. *Forest Genetics*. Centre for Agriculture and Bioscience International.

Recibido: 14 de abril de 2024 **Aceptado para publicación:** 02 de diciembre de 2024