

Universidad Nacional de Costa Rica

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Escuela de Ciencias Ambientales

**Nombre del TFG: Evaluación a los 9 años de edad, de propiedades de la
madera y calidad del fuste en clones de *Swietenia macrophylla* King,
Guápiles, Pococí, Costa Rica**

TFG Modalidad artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Elaborado por:

Diego Armando Céspedes Arias.

Heredia, 2022.

Hoja de miembros del tribunal

Artículo Científico presentado a la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal.

Tribunal examinador

Dr. Mauricio Vega Araya

Decano de la Facultad de Ciencias
de la Tierra y el Mar

Msc. Víctor Meza Picado

Representante de la dirección
de la Escuela de Ciencias Ambientales

Ph.D. Roger Moya Roque
Tutor

Lic. Orlando Chinchilla Mora
Lector

Dr. Albert Morera Beita
Lector

Bach. Diego Armando Céspedes Arias
Estudiante

Fecha

Nota aclaratoria para el lector: el siguiente trabajo escrito se estructuró en dos capítulos, el primero de ellos contempla la evaluación del crecimiento y rendimiento en diámetro, altura total y volumen total de 8 clones de *Swietenia macrophylla* King (caoba), creciendo en una plantación de 9 años en la Zona Atlántica Costa Rica, en el segundo capítulo se desarrolló un artículo científico cuyo objetivo principal fue evaluar y seleccionar los 8 clones de *S. macrophylla*, considerando parámetros del crecimiento del árbol, calidad del tronco y propiedades de la madera, tales como: porcentaje de duramen, módulo de elasticidad dinámica, densidad de la madera en estado verde y gravedad específica. A pesar de que los capítulos se presenten en secciones separadas, los datos del rendimiento en volumen total de los clones a la edad de 9 años y expuestos en el capítulo 1, se utilizaron junto con los valores encontrados de calidad del fuste y propiedades de la madera para el análisis y selección de los mejores clones desarrollado en el artículo del capítulo 2.

Tabla de Contenido

Capítulo 1. Evaluación del crecimiento de 8 clones de <i>Swietenia macrophylla</i> King, en una plantación de 9 años en Costa Rica.....	4
1.1. Resumen	4
1.2. Introducción	5
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Marco teórico	7
1.4.1. Generalidades de la especie <i>Swietenia macrophylla</i> King	7
1.4.2. Aspectos silviculturales de la caoba	8
1.4.2. Estudio del crecimiento dasométrico.....	9
1.5. Materiales y métodos.....	10
1.5.1. Ubicación, diseño y manejo silvicultural del ensayo de clones de caoba ...	10
1.5.2. Selección de los clones a estudiar	12
1.5.3. Estimación de la sobrevivencia y crecimiento de los clones a la edad evaluada.....	13
1.5.4. Análisis estadístico	14
1.6. Resultados y discusión	14
1.6.1. Evaluación del crecimiento y sobrevivencia de los clones a los 9 años	14
1.7. Conclusiones	17
1.8. Referencias bibliográficas	18

Capítulo 2. Evaluación y clasificación de 8 clones de <i>Swietenia macrophylla</i> King, considerando la calidad del tronco y propiedades de la madera en una plantación de 9 años en Costa Rica.....	23
2.1. Resumen	23
Abstract	24
2.2. Introducción	25
2.3. Objetivos específicos	27
2.4. Marco teórico	27
2.4.1. Alcances en la investigación de la madera de <i>S. macrophylla</i>	27
2.4.2. Características físicas y mecánicas de la madera.....	29
2.4.3. Densidad de la madera.....	29
2.4.4. Duramen.....	30
2.4.5. Módulo de elasticidad dinámico de la madera	31
2.4.6. Calidad del fuste del árbol para aserrío	31
2.5. Materiales y métodos.....	32
2.5.1. Descripción del sitio de estudio.....	32
2.5.2. Características del ensayo clonal	33
2.5.3. Selección de los clones	33
2.5.4. Determinación de calidad del árbol en pie de los clones seleccionados	34
2.5.5. Muestreo y determinación de las propiedades de la madera	35
Determinación del módulo de elasticidad dinámico	36

Densidad verde	37
Peso específico básico de la madera	37
Porcentaje de duramen	38
2.5.6. Índices de selección de los mejores clones	39
2.5.7. Análisis estadístico	40
2.6. Resultados y Discusión.....	41
2.6.1. Evaluación de la calidad del tronco los árboles.....	41
2.6.2. Porcentaje de duramen (%D), peso específico básico (PEB) y densidad verde (DV)	43
2.6.3. Variación del módulo de elasticidad (ModED) dinámico de la madera	47
2.6.4. Selección de los mejores clones.....	51
2.7. Conclusiones	52
2.8. Recomendaciones	52
2.9. Agradecimientos	53
2.10. Referencias bibliográficas	54

Capítulo 1. Evaluación del crecimiento de 8 clones de *Swietenia macrophylla* King, en una plantación de 9 años en Costa Rica

Diego Céspedes Arias

1.1. Resumen

Generar información sobre el crecimiento de la especie *Swietenia macrophylla*. King (caoba) representa una oportunidad para coadyuvar en los procesos de planificación y toma de decisiones de manejo forestal para esta especie. El objetivo de esta investigación fue determinar la sobrevivencia y la variabilidad del crecimiento en términos de altura, diámetro y volumen, para un conjunto de 8 clones de *S macrophylla*. King, a los 9 años de edad, creciendo en la zona atlántica de Costa Rica. El porcentaje de supervivencia para todos los clones evaluados fue superior al 75%. Se lograron encontrar diferencias significativas en las variables dasométricas estudiadas entre clones. El diámetro promedio alcanzado por los clones fue de 20,17 cm*árbol-1 y 16,10 m*árbol-1 de altura total (IMA: 2,27 cm*árbol-1*año-1 y 1,81 m*árbol-1*año-1 y respectivamente). El rendimiento promedio del conjunto genético fue de 0,2688 m³*árbol-1 (IMA: 0,0305 m³*árbol-1*año-1). Los resultados sugieren que el conjunto de clones evaluados presenta una alta resistencia a las condiciones del sitio y a la mortalidad natural; además, las variables dasométricas estudiadas reflejan un buen rendimiento con incrementos de intermedios a altos, para este tipo de material genético.

Palabras clave: clones de caoba, ensayo clonal, incremento, variables dasométricas.

1.2. Introducción

Debido a la disminución de la producción de madera en los bosques tropicales a nivel mundial, las plantaciones forestales han surgido como una opción real para abastecer la demanda de productos de este material y una forma de contrarrestar los retos que impone esta problemática (Whitmore, 1998; Arce, 2009; FAO, 2010). En cuanto a las especies utilizadas en plantaciones forestales, éstas han sido ampliamente estudiadas y utilizadas con diversos fines productivos en diferentes mercados (Ladrach, 2010). En Costa Rica, mayoritariamente se han utilizado especies exóticas de rápido crecimiento y otras especies nativas promisorias para la reforestación comercial (Rojas, 2001; Moya et al., 2008).

En cuanto a la reforestación con especies nativas, se ha mencionado que estas pueden brindar múltiples beneficios, tales como la producción de madera, equilibrio ecológico, protección de suelos, protección del recurso hídrico y acumulación de carbono (Alice et al., 2004). A pesar de los grandes esfuerzos realizados en Costa Rica en investigación y promoción de la reforestación con estas especies, existen factores que dan una respuesta a su bajo impacto en el mercado, como la competencia con especies exóticas de rápido crecimiento, la ausencia de fuentes de germoplasma certificado, el desplazamiento del mercado nacional de madera por productos maderables importados y sustitutos de la madera (Murillo et al., 2015).

Una de las especies nativas promisorias para la reforestación comercial en Costa Rica es la especie *Swietenia macrophylla* King, debido a que la actualidad es adecuada para la producción de madera en plantaciones forestales, por su excelente calidad (Krisnawati, Kallio y Kanninen, 2011) y es la especie maderable de mayor valor económico en selvas neotropicales (Lugo, 2005). De acuerdo con Lamb (1966, como se citó en Krisnawati et al., 2011), la caoba es una especie tropical nativa de América Central y del sur, con una amplia distribución que se extiende desde México a Bolivia y el centro de Brasil. Esta especie es emblema de conservación, debido a los efectos negativos de su explotación comercial y a su gran demanda en el mercado de maderas (Sabido y Novelo, 2005). Debido al agotamiento de sus poblaciones naturales, en el año 2002, la especie se

incluyó en el Apéndice II del Convenio sobre Comercio Internacional de Especies en Peligro de Extinción de Fauna y Flora Silvestres (CITES) (Grogan y Barreto, 2005).

La caoba es adecuada para la producción de madera en plantaciones forestales, debido a su valorización por factores como su color, calidad de acabado y estabilidad dimensional (Krisnawati et al., 2011). Entre los distintos usos de la madera de esta especie, destacan: la construcción, madera contrachapada, construcción de muebles, ebanistería y otros elementos de alta calidad (Krisnawati et al., 2011). Esta madera tiene alta durabilidad, excelente calidad estética y buenas propiedades de trabajabilidad (Moya et al., 2015; Forero-Montaña et al., 2021).

Desde el año 2006, el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), ha venido desarrollando un proyecto pionero en América Latina, basado en el mejoramiento genético de la Caoba, cuyo objetivo principal ha sido la identificación y clonación de genotipos superiores de la especie, de rápido crecimiento y con una excelente forma de fuste (Chinchilla, Corea y Meza, 2018). El proyecto del INISEFOR, también ha desarrollado métodos de manejo silvicultural para atacar el problema generado por el barrenador del tallo de las meliáceas (*Hypsipyla grandella* Zeller), y además actualmente, ha logrado desarrollar un paquete tecnológico para el manejo de plantaciones en los primeros cuatro años, desde su establecimiento (Chinchilla, Corea y Meza, 2018).

A través del proyecto de mejoramiento genético de la Caoba del INISEFOR, se han logrado establecer ensayos clonales en diferentes zonas de Costa Rica, con el fin de determinar el desempeño y determinar las mejores procedencias y progenies, para así poder seleccionar el material genético más apropiado en el establecimiento de plantaciones forestales. Debido a lo anterior, una de las necesidades técnicas del proyecto, ha sido generar información sobre el crecimiento y desarrollo de los clones, debido también a que para la especie existe poca información cuantitativa sobre tales aspectos en diferentes sistemas productivos (García, 1998, como se citó en Corea et al., 2020). Las evaluaciones del crecimiento y otros estudios de los ensayos clonales, facilitarían las labores de planificación y ordenamiento forestal para eventualmente lograr un manejo intensivo de esta especie con el uso de clones superiores, contribuyendo al mismo tiempo, a

incrementar significativamente las tasas de crecimiento y la calidad de los productos esperados de este material genético (Corea et al., 2020).

Al respecto, en el presente documento se evalúa un conjunto de 8 clones de caoba (*Swietenia macrophylla*. King) seleccionados por parte del equipo técnico del INISEFOR de la Universidad Nacional, en un ensayo clonal establecido en la zona Caribe de Costa Rica, con el objetivo de conocer la variabilidad del desempeño del crecimiento en términos de supervivencia, altura, diámetro y volumen a los 9 años de edad. La finalidad del trabajo es obtener datos de crecimiento de los clones, que se complementarán con otros datos sobre propiedades de la madera y calidad del fuste, para que se puedan emplear como diferenciales de selección de los clones en el posterior trabajo de esta investigación.

1.3. Objetivos

- Estimar el crecimiento de ocho clones seleccionados de caoba a los 9 años de edad, en un ensayo clonal establecido en el sitio “La Colonia” de Pococí, perteneciente a la provincia de Limón en Costa Rica.
- Comparar estadísticamente las variables dasométricas de crecimiento entre los clones seleccionados.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Generalidades de la especie *Swietenia macrophylla* King

Los individuos de esta especie se caracterizan por alcanzar alturas de 7 a 40 m, con el follaje de color verde lustroso y hojas agrupadas hacia el ápice de las ramas, con los folíolos claramente asimétricos en la base y los frutos grandes y leñosos (Zamora, 2000). Esta especie presenta un follaje caducifolio, sus hojas son paripinnadas, alternas y grandes, con 3 a 8 pares de folíolos (Rojas y Torres, 2008).

La especie *S. macrophylla*, es una especie de árbol tropical nativo de América Central y del Sur, con una amplia distribución que se extiende desde México a Bolivia y el centro de Brasil (Lamb, 1966, como se citó en Krisnawati et al., 2011). En Costa Rica se

encuentra en la región del Pacífico Central, en la provincia de Guanacaste y Los Chiles; Además, es plantada en varias regiones del país (Rojas y Torres, 2008). La caoba es considerada una especie de rápido crecimiento que en Costa Rica se puede cultivar en gran parte del territorio, en elevaciones menores a los 1200 msnm y en zonas de alta y baja precipitación (Corea, 2012).

La caoba se considera una de las especies finas y con más demanda a nivel mundial, debido a sus excelentes propiedades de la madera, la cual es utilizada en paredes, techos, puertas, pisos y artículos de ebanistería (Zamora, 2000).

1.4.2. Aspectos silviculturales de la caoba

La especie *S. macrophylla* ha sido probada en condiciones de rápido crecimiento en plantación y se ha observado que las plantaciones comerciales presentan buen crecimiento en diámetro, en países de áreas de crecimiento natural y otros países de regiones tropicales de Asia, Oceanía y África (Forero-Montaña et al., 2021). Los aspectos de la producción, establecimiento y manejo de *S. macrophylla* en plantaciones fueron ampliamente detallados por Krisnawati et al. (2011) y Pérez (2017). Estos autores enfatizaron que el período de rotación de la especie tiene un rango de 20 a 60 años.

Sin embargo, la silvicultura de especies en la reforestación comercial ha cambiado en la actualidad (Zobel, 1981). Se ha establecido el concepto de plantaciones de rápido crecimiento, donde se menciona que el período de rotación en las regiones tropicales es menor a 25 años (Zobel, 1984). Se ha producido un período de rotación corto debido a la mejora de las técnicas de reproducción y establecimiento de plántulas, la mejora genética (Murat, 2020) y la silvicultura intensiva (Turchetto et al., 2020), así como un mayor control o seguimiento del crecimiento (Trisasongko y Paull, 2018).

En el caso del mejoramiento genético, se señala que el uso de clones en especies frondosas puede producir una ganancia genética entre 25% y 50% (Wu, 2019), en base a incrementar la producción de plantaciones con árboles de adecuado desarrollo en diámetro, calidad del árbol y madera de alta calidad (Liu, 1970). *S. macrophylla* es una especie que responde muy bien a la selección estricta de árboles superiores o plus

(Gutiérrez et al., 2016) y se han registrado excelentes resultados en los diferentes ensayos de clonación (Sudrajat et al., 2021).

En Costa Rica, *S. macrophylla* se introdujo en programas de reforestación para la producción de trozas para aserrío o para la recuperación de sitios abandonados (Gerhardt y Fredriksson, 1995). Recientemente se han sembrado series de ensayos de diferentes clones, donde se ha evaluado su crecimiento, productividad e incluso costos asociados a la reforestación con esta especie (Chinchilla-Mora et al., 2020, Chinchilla-Mora et al., 2021, Corea-Arias et al., 2020). Además, las trozas de árboles de plantaciones forestales han mostrado buena calidad para el aserrío, así como secado rápido y buena trabajabilidad (Moya et al., 2019).

1.4.2. Estudio del crecimiento dasométrico

Según Prodan et al., (1997) la dasometría es una ciencia que se ocupa de la medición y estimación de las dimensiones de los árboles y bosques, así como de la estimación de su crecimiento. De acuerdo con Rojas (1977, como se citó en Detlefsen y Somarriba, 2012) la dasometría proporciona las herramientas básicas para cuantificar el crecimiento y la producción forestal con la utilización de técnicas de medición y estimación de las dimensiones de árboles y bosques. Las estimaciones del crecimiento, en variables como volumen, biomasa o carbono, sobre el componente árbol, son indispensables para el manejo y aprovechamiento de las distintas masas forestales (Detlefsen y Somarriba, 2012).

De acuerdo con Prodan et al. (1997) el crecimiento se define como el incremento de un organismo o población en un determinado periodo de tiempo, mientras que el rendimiento se traduce como el crecimiento acumulado hasta una edad determinada. El crecimiento de bosques, plantaciones o de sistemas agroforestales se puede expresar como el aumento gradual de las variables diámetro, la altura y el volumen en un periodo determinado de tiempo y se da debido a la actividad fisiológica de la planta (Aldana, 2008).

El crecimiento de árboles individuales está influido por la calidad del sitio en donde influyen factores genéticos, climáticos, edafológicos y el conjunto de interacciones con el medio ambiente (Prodan et al., 1997). En árboles maduros, el crecimiento por lo general

se expresa en términos de volumen, siendo adecuado el volumen cúbico del fuste como expresión del crecimiento del árbol (Prodan et al., 1997). A la vez el crecimiento en volumen depende del crecimiento en diámetro, altura y de la forma del fuste (Aldana, 2008). El crecimiento en diámetro está influenciado por la actividad del cambium, mientras que el crecimiento en altura esta influenciado por la actividad de la yema o meristemo terminal (Aldana, 2008).

Desde el punto de vista del manejo forestal la estimación del crecimiento es esencial, debido a que cuanto más se conozca este parámetro, habrá más eficiencia en la planificación de los trabajos de silvicultura, ordenación forestal y en el uso de los productos forestales a obtener (Prodan et al., 1997; Aldana, 2008).

Uno de los parámetros indicadores del crecimiento de un árbol o masa forestal es el incremento medio anual. Este parámetro se define como el promedio anual del incremento total, que se obtiene al dividir las dimensiones de un árbol o masa entre su edad (Klepac, 1983).

1.5. Materiales y métodos

1.5.1. Ubicación, diseño y manejo silvicultural del ensayo de clones de caoba

Los clones a estudiar se localizan en un ensayo clonal de 2 hectáreas de extensión, ubicado en la Región Huetár Atlántica de Costa Rica, en el distrito La Colonia (N10°15'46,0879" y W83°49'14,23740") del Cantón de Pococí, perteneciente a la Provincia de Limón-Costa Rica (**Figura 1**). El ensayo pertenece al Instituto de Investigación y Servicios forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y fue establecido en diciembre del año 2010. Al momento del muestreo en el año 2019, el ensayo tenía una edad de 9 años (**Figura 2**). En este sitio se presenta una precipitación promedio anual superior a 4500 mm, una temperatura media anual de 24,4°C y no presenta una época seca definida (IMN, 1999).

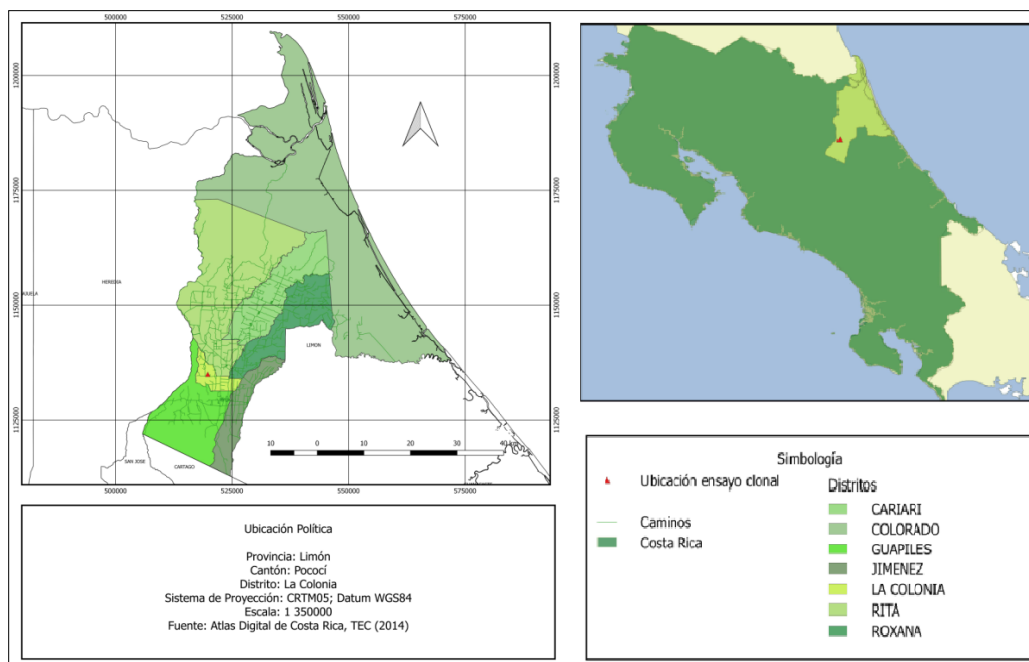


Figura 1. Ubicación del ensayo clonal de *Swietenia macrophylla* King (caoba), INISEFOR-UNA, Limón-Costa Rica.

El ensayo fue establecido en un diseño de cinco bloques incompletos al azar de 580 árboles cada uno, en donde cada bloque se compone de 116 clones y un testigo de árboles de semilla. Cada clon dentro del bloque se repitió en 5 ocasiones dispuestos en parcelas en línea y con un espaciamiento de 3 m x 3 m entre árboles (Chinchilla et al., 2020).

Para establecer el ensayo, una vez preparado el terreno, se procedió a cavar los hoyos de aproximadamente 30 cm de diámetro por 30 cm de profundidad. Se aplicaron 50 g de fertilizante fórmula completa nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K) a razón de 10-30-10. Desde su establecimiento, el ensayo clonal ha recibido prácticas silviculturales como limpieza y control de malezas una vez por año y también recibió un único control químico fitosanitario contra el barrenador *Hypsipyla grandella* (Zeller) en el primer año. Cuando fue necesario, se realizaron podas de ramas axilares para permitir una mayor calidad en el fuste, y lograr con esto, madera libre de nudos (Chinchilla et al., 2020). Además, desde su establecimiento, el ensayo clonal se ha medido periódicamente, con el fin de monitorear el desarrollo de los clones, familias y procedencias, en cuanto a las variables altura total, diámetro a la altura de pecho (DAP) y volumen.



Figura 2. Aspecto del ensayo de clones de *Swietenia macrophylla* King (caoba) de 9 años, INISEFOR-UNA, Limón-Costa Rica.

1.5.2. Selección de los clones a estudiar

Los clones de caoba a estudiar, fueron seleccionados a criterio experto por parte de los encargados del proyecto de mejoramiento genético de la caoba del INISEFOR, debido a que de los 116 genotipos (clones) establecidos en la plantación, solo ocho de ellos han mostrado el mejor desempeño en variables dasométricas como diámetro (mayor a 12 cm), altura, calidad del tronco y resistencia a plagas y enfermedades, en evaluaciones anteriores. Las procedencias de clones fueron cuatro de Costa Rica y cuatro de Bolivia (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Clones seleccionados para el estudio y su procedencia.

Clon	Procedencia
1	Costa Rica
2	Costa Rica
5	Costa Rica

Clon	Procedencia
6	Costa Rica
79	Bolivia
80	Bolivia
186	Bolivia
207	Bolivia

1.5.3. Estimación de la sobrevivencia y crecimiento de los clones a la edad evaluada

Para el análisis de crecimiento y sobrevivencia se utilizó la base de datos de mediciones del ensayo clonal a la edad de 9 años, realizadas en noviembre del año 2019 por parte del equipo técnico del INISEFOR. La base de datos de las mediciones del ensayo, constan de la medición del DAP (cm) de todos los árboles, medido con cinta diamétrica y de las mediciones de las alturas totales (m) de todos los árboles, obtenidas a través de un hipsómetro Vertex.

La sobrevivencia se determinó como el porcentaje de individuos vivos de los clones, registrados en las mediciones a los 9 años, con respecto a la totalidad de esos clones plantados al inicio del ensayo.

Para el análisis de crecimiento se determinaron los promedios de las variables DAP, altura total, volumen total y su incremento medio anual (IMA). El volumen total y su incremento medio anual se determinaron a través de la **Ecuación 1** y la **Ecuación 2**, respectivamente.

$$VT = \left(\frac{DAP(cm)}{100} \right)^2 * 0.7854 * H * ff \quad (1)$$

Donde:

VT = volumen total en m³.

DAP = diámetro a 1,3 m desde la base del árbol en centímetros, medido con cinta métrica.

H= altura total del árbol en metros.

ff = factor de forma del fuste con un valor promedio de 0,5.

$$IMA(vt) = \left(\frac{VT}{Edad \text{ en años}} \right) \quad (2)$$

Donde:

IMA (vt) = incremento medio anual del volumen total en m³.

VT = volumen total en m³.

1.5.4. Análisis estadístico

Para la descripción estadística de las variables en estudio, se utilizaron tablas con información descriptiva. Se verificó que las variables cumplieran con el supuesto de normalidad y de homogeneidad de las varianzas. Para determinar las diferencias estadísticas entre las medias de las variables de los diferentes clones, se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples con la prueba de Tukey a un nivel estadístico de significancia (p) de 0,05. El análisis de varianza paramétrico y las pruebas de comparación se realizaron utilizando el programa InfoStat 2020.

1.6. Resultados y discusión

1.6.1. Evaluación del crecimiento y sobrevivencia de los clones a los 9 años

En el **Cuadro 2** se presentan los datos de tres variables dasométricas y la sobrevivencia a los 9 años de edad para el grupo de clones de caoba seleccionados. De acuerdo con las mediciones del ensayo clonal a los 9 años, los clones 2, 6 y 79 mostraron una sobrevivencia del 100 % del total de individuos establecidos inicialmente. En el caso de los clones 1, 5, 80 y 207, estos mostraron un porcentaje de sobrevivencia por encima del 85 % del total de individuos inicialmente establecidos en el ensayo clonal. Finalmente, el clon 186 fue el que presentó el menor porcentaje de sobrevivencia del total de clones, con una sobrevivencia del 75 % del total de individuos establecidos inicialmente.

Cuadro 2. Promedio de tres variables dasométricas y el porcentaje de sobrevivencia, de ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años de edad, Limón-Costa Rica.

Clon	DAP (cm)	Altura total (m)	Volumen total	
			(m ³ *árbol ⁻¹)	Sobrevivencia (%)
1	20,64 (3,78) ^{BC}	15,70 (2,01) ^B	0,2799 (0,13) ^{BC}	87,50
2	19,66 (2,35) ^B	17,54 (1,38) ^D	0,2730 (0,08) ^{BC}	100,00
5	21,04 (1,97) ^{BC}	17,35 (1,26) ^D	0,3070 (0,07) ^{BC}	95,83
6	22,64 (2,16) ^C	17,23 (1,23) ^{CD}	0,3520 (0,08) ^C	100,00
79	17,02 (2,77) ^A	13,91 (1,89) ^A	0,1663 (0,07) ^A	100,00
80	20,12 (2,63) ^B	15,32 (1,67) ^{AB}	0,2515 (0,09) ^B	95,83
186	20,48 (2,34) ^{BC}	15,83 (1,63) ^{BC}	0,2714 (0,10) ^{BC}	75,00
207	19,72 (2,63) ^B	15,71 (1,52) ^B	0,2377 (0,10) ^{AB}	87,50
Prom.	20,17	16,10	0,2688	

Nota: el número entre paréntesis al lado del promedio representa la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna del promedio indican diferencias significativas con la prueba de Tukey a un valor de $p < 0,05$.

En promedio, las variables dasométricas de todo el conjunto de clones evaluados presentaron los siguientes valores por árbol: DAP = 20,17 cm, altura total = 16,10 m y volumen total = 0,2688 m³. Estadísticamente se lograron determinar diferencias altamente significativas ($\alpha = 0,05$), entre las variables dasométricas estudiadas. En la variable DAP, tanto el clon 79 como el clon 6 difieren estadísticamente entre ellos y con el resto de clones, mostrando valores promedios de 17,02 cm y 22,64 cm, respectivamente. Para la misma variable DAP, entre los restantes clones, no se presentaron diferencias significativas. En cuanto a la altura total, las similitudes estadísticas se presentaron en cuatro subgrupos: clones 79 y 80 (subgrupo 1), clones 80, 1, 207 y 186 (subgrupo 2), clones 186 y 6 (subgrupo 3) y los clones 6, 5 y 2 (subgrupo 4). Para la variable volumen total, se encontraron diferencias altamente significativas entre el clon 6 y los clones 79, 207 y 80,

los cuales presentaron valores medios por árbol para esta variable de: 0,3520, 0,1663, 0,2377 y 0,2515 m³*árbol⁻¹, respectivamente.

El valor promedio del DAP (20,17 cm) del conjunto de clones, refleja un alto rendimiento a la edad evaluada. La superioridad del valor anterior se puede comparar con los resultados reportados para otras especies nativas usadas en plantaciones forestales, por ejemplo, la especie *Hyeronima alchorneoides* Allemão (pilón) en plantaciones de 9 años en la zona norte de Costa Rica, que alcanzó un valor promedio del DAP de 13,67 cm en dos sitios distintos. Asimismo, el promedio del DAP de los clones de caoba de este estudio, se acerca al alcanzado por la especie *Vochysia guatemalensis* Donn Sm (cebo), la cual mostró un valor del DAP de 22,8 cm a la misma edad y en la misma zona del trópico húmedo de Costa Rica (Castillo et al., 2003). En México, Pérez et al., (2012) reportaron un valor referencial de altura de 17, 5 m a una edad base de 10 años, como indicador de un índice de sitio clasificado como alto para plantaciones de caoba en el trópico de ese país; este valor es cercano al promedio general de la variable altura total encontrado en el conjunto de clones que se evaluó (16,10 m).

En cuanto al incremento medio anual (IMA) por árbol, el conjunto de clones registró en promedio los siguientes valores: DAP = 2,27 cm*año⁻¹, altura total = 1,81 m* año⁻¹ y volumen total = 0,0305 m³*año⁻¹ (**Cuadro 3**). Los clones que mostraron un mayor IMA en la variable DAP al compararse con el promedio general fueron los clones 1, 5, 6 y 186 y el valor más bajo para esa misma variable fue para el clon 79. En cuanto al IMA de la variable altura total, los valores más altos con respecto a la media general se dieron para los clones 2, 5 y 6 y el valor más bajo lo presentó el clon 79.

Cuadro 3. Incremento medio anual (IMA) de tres variables dasométricas en ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años de edad, Limón-Costa Rica.

Clon	IMA DAP (cm* árbol ⁻¹)	IMA Altura total (m* árbol ⁻¹)	IMA Volumen total (m ³ *árbol ⁻¹)
1	2,32 (0,43)	1,76 (0,23)	0,0315 (0,01)
2	2,21 (0,26)	1,97 (0,16)	0,0307 (0,01)
5	2,36 (0,22)	1,95 (0,14)	0,0345 (0,01)

	IMA DAP	IMA Altura total	IMA Volumen total
Clon	(cm* árbol⁻¹)	(m* árbol⁻¹)	(m³*árbol⁻¹)
6	2,54 (0,24)	1,94 (0,14)	0,0395 (0,01)
79	1,91 (0,31)	1,56 (0,21)	0,0187 (0,01)
80	2,26 (0,30)	1,72 (0,19)	0,0283 (0,01)
186	2,30 (0,27)	1,78 (0,18)	0,0305 (0,01)
207	2,22 (0,30)	1,77 (0,17)	0,0267 (0,01)
Prom.	2,27	1,81	0,0305

Nota: el número entre paréntesis al lado del promedio representa la desviación estándar.

Para la variable de volumen total, los valores promedio más altos en el IMA se mostraron en los clones 1, 2, 5 y 6 y el más bajo para el clon 79. Además, de acuerdo con los resultados del IMA por árbol, se observa que la mayoría de los clones (clones 1,2,5,6) superan el promedio general (0,0305 m³*árb⁻¹) del conjunto, lo que indica su alta productividad y define una variable de selección para los mejores clones.

1.7. Conclusiones

A la edad evaluada, el conjunto de clones seleccionado mostró una alta resistencia a las condiciones del sitio y a la mortalidad natural por diversos factores, entre ellos el ataque de plagas y enfermedades, reflejándose en los altos valores del porcentaje de sobrevivencia para cada clon.

Los clones de caoba evaluados mostraron diferencias estadísticas significativas en las variables de crecimiento y de rendimiento evaluadas. Del total de clones, los mejores clones en cuanto a crecimiento en altura fueron los clones 2,5,6 y en cuanto a la variable diámetro fueron los clones 1,5,6 y 186. El conjunto de clones mostró un buen rendimiento, ya que a la edad evaluada se presentaron incrementos considerados de intermedios a altos para esta especie.

La importancia de este trabajo radica en que las evaluaciones del crecimiento y otros estudios de los ensayos clonales, facilitarían las labores de planificación y ordenamiento forestal de esta especie con el uso de clones superiores y también es congruente con lo expuesto por Corea et al., (2020) quienes mencionan que la selección y el uso de árboles

genéticamente superiores de caoba, contribuirían a incrementar los rendimientos por unidad de área y la calidad de los productos por obtener en diversas zonas.

1.8. Referencias bibliográficas

Aldana Pereira, E. (2009). Medición forestal: texto para la carrera Ingeniería Forestal. Plaza de la Revolución, Cuba: Editorial Universitaria.

Alice, F., Montagnini, F; & Montero, M. (julio-diciembre 2004). Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la estación biológica la Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28 (2), 61-71. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43628206>

Arce, H. (marzo 2009). Plantaciones, sistemas agroforestales e industria. *Ambientico*, número 186, 13-16. Recuperado de http://www.ambientico.una.ac.cr/rev_ambientico.php?revID=186

Castillo, M; Delgado, A; Montero, M; & Murillo, O.(2003). Crecimiento de especies forestales nativas en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, vol. 27 (1), 63-78.

Chinchilla Mora, O., Corea Arias, E., & Meza Picado, V. (2018). *Silvicultura de Clones superiores de Caoba (Swietenia macrophylla) en los primeros cuatro años de crecimiento, Costa Rica*. Universidad Nacional. 38 p.

Corea Arias, E. (2012). Selección de clones superiores de caoba (*Swietenia macrophylla*) para sistemas agroforestales. *Ambientico*, 229, 42-47.

Corea-Arias, Eugenio; Chinchilla-Mora, Orlando; Meza Picado, Victor Hugo; & Avila, Carlos. (2020). Selección temprana de clones de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en sistemas agroforestales. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 68–83. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5291>

Chinchilla, Orlando; Corea, Eugenio; & Meza, Víctor. (2020). Mejora genética y costos iniciales asociados al manejo de plantaciones clonales de *Swietenia macrophylla* en la región noreste de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 180-189. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.54-2.10>

- Chinchilla-Mora, O; Corea-Arias, E., Meza-Picado, V., & Ávila-Arias, C. (2021). Crecimiento, rendimiento y costos durante los primeros tres años de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) establecida en sistemas agroforestales. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(42), 62–73. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5540>
- Corea-Arias, E; Chinchilla-Mora, O; Meza-Picado, V; & Ávila-Arias, C. (2020). Costos cultivo de clones superiores de caoba (*Swietenia macrophylla* King) hasta 4 años de edad en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 84–95. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5292>
- Detlefsen, G. y Somarriba, E. (2012). Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica. Turrialba, C.R.: CATIE.
- Forero-Montaña, J., Zimmerman, J. K., González, E., Wadsworth, F., Ward, S., Meléndez Ackerman, E. J., Santiago, L. E., & Lee, C. A. (2021). Developing a growth and yield model for planted big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) at advanced age in subtropical moist forest in Puerto Rico. *Trees, Forests and People*, 5, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100113>
- Gerhardt, K., & Fredriksson, D. (1995). Biomass Allocation by Broad-Leaf Mahogany Seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in Abandoned Pasture and Secondary Dry Forest in Guanacaste, Costa Rica. *Biotropica*, 27, 174-182. <https://doi.org/10.2307/2388993>
- Grogan, J., & Barreto, P. (2005). Big-leaf *Swietenia macrophylla* on CITES Appendix II: big challenge, big opportunity. *Conservation Biology*, 19(3), 973-976.
- Gutiérrez Vázquez, Benito N., Cornejo Oviedo, Eladio H., Rodríguez Santiago, Bartolo, López Upton, Javier, Gutiérrez Vázquez, Mario H., Gómez Cárdenas, Martín, & Flores Montaña, Amelia. (2016). Selection of outstanding mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in a natural stand based on multivariate methods. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 51-63. Recuperado en 06 de septiembre de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000500051&lng=es&tlng=en.

- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (1999). Promedios mensuales de datos climáticos de la estación automática de los diamantes en Guápiles del período 1964-1998.
- Klepac, D. (1983). *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales* (2da Ed.). México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Krisnawati, H., Kanninen, M., & Kallio, M. (2011). *Swietenia macrophylla King: Ecology, silviculture and productivity*. Center for International Forestry Research (CIFOR). 22 p.
- Ladrach, W. E. (2010). *Manejo práctico de plantaciones forestales en el trópico y subtrópico*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 660 p.
- Liu CP. (1970). The genetic improvement of Honduras Mahogany. I. Studies on natural variation and individual selection. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 3(3): 41-56.
- Lugo, A. E. (2005). El manejo de la caoba define la agenda de conservación. *Recursos Naturales y Ambiente*, 0 (44), 6-8. Recuperado de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RRNA/article/view/513>
- Moya, R; Muñoz, F; Salas, C; Berrocal, A; Gamboa, N; Leandro, L. (2008). Informe final de proyecto de investigación: “*Maderas de Reforestación Hacia la Sostenibilidad (MADERHAS)*”, (Proyecto VIE-5402-1401-9301). Cartago, Costa Rica: Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITEC). 223 p. Recuperado de <https://repositorio-tec.tec.ac.cr/handle/2238/760>
- Moya, Róger, Salas, Cynthia, Berrocal, Alexander, & Valverde, Juan Carlos. (2015). Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fastgrowing plantation species in Costa Rica. *Madera y bosques*, 21(spe), 31-47. Recuperado en 06 de septiembre de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000400003&lng=es&tlng=en.

- Moya R, Tenorio C., Muñoz F., Salas J. & Berrocal A. (2019). *Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas Técnicas*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. ISBN 978-9977-66-456-9. Cartago, Costa Rica, 494 p.
- Murat, A. (2020). Silviculture and tree breeding for planted forests. *Eurasian Journal of Forest Science* 8(1): 60-69.
- Murillo Gamboa, O., Badilla Valverde, Y., Rojas Parajeles, F., Torres Córdoba, G., Carvajal Vanegas, D. y Canessa Mora, R. (2015). Informe Final de Proyecto de Investigación: *Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores* (Código del proyecto 5401-1401-1022). Cartago, Costa Rica: Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Instituto tecnológico de Costa Rica. Recuperado de https://repositorio-tec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6438/Doc_%20Informe_Final_Especies_Nativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. 347 p. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com>
- Pérez González, Guadalupe; Etchevers Barra, Jorge D., Domínguez-Domínguez, Marivel, & Martínez-Zurimendi, Pablo (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 7-24. DOI: 10.21829/myb.2012.181511
- Pérez, J. (2017). *Manual para el cultivo de la caoba*, Informe Técnico 1. Instituto Laudato Si. Centro de Investigación, Enseñanza y Producción Agroforestal (CEPIAGRY), Perú. <https://www.laudatosiinstitute.org/wp-content/uploads/manual-de-caoba-ISBN.pdf> .
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox F.; & Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. Proyecto IICA BMZ / GTZ, Sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, San José, Costa Rica. 561 p.
- Rojas, F. (2001). *Plantaciones Forestales*. 2 ed. EUNED. San José, CR. 260 p.

- Rojas Rodríguez, F y Torres Córdoba, G. (2008). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción Caoba. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(14), pág. 80–82. Recuperado a partir de <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/429>
- Sabido, W., & Novelo, D. (2005). La caoba y el manejo forestal sostenible en Belice. *Recursos Naturales y Ambiente*, 44, 53-59.
- Sudrajat, D., Ayyasy, Y., Siregar, I., & Karlinasari, L. (2021). Mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) as urban tree: Tree growth and wood quality variation in a progeny test. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 918 (1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/918/1/012042>
- Trisasongko, B.H., & Paull, D.J. (2018). A review of remote sensing applications in tropical forestry with a particular emphasis in the plantation sector. *Geocarto International*, 35, 317 - 339. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1516245>
- Turchetto, F., Araujo, M., Griebeler, A., Rorato, D., Berghetti, A., Barbosa, F., & Lima, M. (2020). ¿Can intensive silvicultural management minimize the effects of frost on restoration plantations in subtropical regions? *Journal of Environmental Management*, 269, 110830. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110830>
- Whitmore, J.L. (1998). La importancia social y ambiental de las plantaciones forestales. En actas: *Primer Congreso Latinoamericano IUFRO, El manejo sustentable de los recursos forestales, desafío del Siglo XXI*, 22 al 28 de noviembre de 1998. Valdivia, Chile.
- Wu, HX. (2019). Benefits and risks of using clones in forestry—a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 34(5): 352-359.
- Zamora, N. (2000). *Árboles de la Mosquitia hondureña: descripción de 150 especies*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 314 p.
- ZOBEL B. (1981). Wood quality from fast-grown plantations. *Tappi Journal* 64: 61-74.
- ZOBEL B. (1984). The changing quality of the world wood supply. *Wood Science and Technology* 18: 1-17.

Capítulo 2. Evaluación y clasificación de 8 clones de *Swietenia macrophylla* King, considerando la calidad del tronco y propiedades de la madera en una plantación de 9 años en Costa Rica

Diego Céspedes Arias

2.1. Resumen

Generar información sobre la calidad y características de la madera de *Swietenia macrophylla* (King) representa una oportunidad para coadyuvar en los procesos de planificación y toma de decisiones de manejo forestal para esta especie. El objetivo de esta investigación fue determinar las propiedades físicas de la madera y la calidad del fuste de ocho clones de caoba de 9 años. Para el muestreo de las propiedades de la madera se emplearon métodos no destructivos en los árboles en pie y mediciones de muestras de madera en laboratorio. La determinación de la calidad de los clones consistió en la valoración de la fisionomía externa del fuste de cada una de las trozas comerciales de los árboles en pie. Posteriormente se emplearon dos índices de selección de los mejores clones, uno basado en la ponderación de variables de volumen total (m³) en pie, ModEDL (MPa), porcentaje de duramen y PEB, y el otro, utilizando el peso de las variables volumen comercial y calidad general del árbol promedio para cada clon. Los valores promedio del conjunto de clones para los parámetros módulo de elasticidad dinámica transversal, módulo de elasticidad dinámica longitudinal, peso específico básico, densidad verde, porcentaje de duramen y calidad del árbol en pie fueron 2367,9 MPa, 2946,3 MPa, 0,48, 0,80 g/cm³, 59,64 % y 70,24 %, respectivamente. Los mejores clones en cuanto a los valores medios de las propiedades de la madera y su volumen total fueron los clones 80, 2, 186 y 79. Por otro lado, en cuanto a la calidad general del árbol y el volumen comercial, los mejores clones fueron 5, 6 y 1. Los resultados sugieren que los clones evaluados pueden utilizarse para diferentes propósitos de producción de madera en Costa Rica.

Palabras clave: caoba, propiedades de la madera, calidad de trozas, índices de selección.

Evaluation and classification of 8 clones of *Swietenia macrophylla* King, considering the trunk quality and wood properties in a plantation of 9 years old in Costa Rica

Abstract

Generating information on the quality and characteristics of *Swietenia macrophylla* (King) wood represents an opportunity to assist in the planning and decision-making processes of forest management for this species. The objective of this research was to determine the physical properties of the wood, and the quality of the stem of eight 9-year-old Mahogany clones. For the sampling of wood properties, non-destructive methods were used in the standing trees and measurements of wood samples in the laboratory. The determination of the quality of the clones consisted of the valorization of the external physiognomy of the shaft of each of the commercial logs of the standing trees. Subsequently, two selection indices were used, one based on the weighting of variables of total volume (m³) standing, ModEDL (MPa), percentage of heartwood and PEB, per clone, and the other using the weight of the variables commercial volume and general quality of the average tree. The average values of the set of clones for the parameters transversal dynamic elasticity modulus, longitudinal dynamic elasticity modulus, basic specific weight, green density, percentage of heartwood, and quality of the standing tree were: 2367,9 MPa, 2946,3 MPa, 0,48, 0,80 g/cm³, 59,64 %, and 70,.24 %, respectively. The best clones in terms of the average values of the wood properties and their total volume were clones 80, 2, 186, and 79. On the other hand, concerning the general quality of the tree and the commercial volume, the best clones were 5, 6, and 1. The results suggest that the clones evaluated can be used for different purposes of wood production in Costa Rica.

Key words: mahogany, wood properties, log quality, selection indices.

2.2. Introducción

En Costa Rica, en las últimas décadas, se trató de atender el problema de desabastecimiento de madera proveniente de bosques naturales [1], con el fomento a la producción maderera en plantaciones forestales, utilizando principalmente especies de rápido crecimiento y también con madera extraída de sistemas agroforestales [2], [3], [4], [5]. En los últimos años se ha dado un importante déficit de la producción local de madera proveniente de estas fuentes para satisfacer la demanda nacional [4]. Además de lo anterior, existen varios factores que han contribuido a la baja en el consumo de madera local, entre los que se encuentran el uso de materiales sustitutos (concreto, hierro y aluminio), consumo de madera importada, precios, calidad y falta de información de mercado [6], [7].

Desde el punto de vista del manejo forestal, es fundamental generar información científica y técnica para apoyar los procesos de planificación y toma de decisiones y de esta manera responder a las necesidades de productos y servicios forestales de forma sostenible [8], contribuyendo a incentivar el consumo de madera local. De acuerdo con [6] para generar un aumento en el valor agregado de la madera y la rentabilidad de su producción, es necesario buscar un uso eficiente de este material, a través de la generación de conocimiento acerca de sus propiedades, características y de sus potenciales nichos o segmentos de mercado, a los cuáles debería dirigirse. Sin embargo, según lo expuesto por [9], en Costa Rica la planificación de la reforestación con especies forestales se basa principalmente en parámetros silviculturales y deja de lado muchos otros aspectos de industrialización y comercialización de la madera, para los cuales se necesita generar información técnica con el fin de maximizar los beneficios económicos.

En el mercado maderero costarricense, la especie caoba (*Swietenia macrophylla*) tiene potencial como especie maderable altamente decorativa y solicitada por el mercado [10], [11]. Sin embargo, en la actualidad, la especie no tiene un área importante de cultivo que pueda suplir la demanda [11]. Tal como lo señala [10], un potencial para el éxito de la reforestación comercial con caoba, es emplear innovación tecnológica acompañada de estudios acerca de sus características tecnológicas y de la industrialización de su madera proveniente de raleos y cosechas finales.

Desde el año 2006, el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) ha venido desarrollando un proyecto pionero en América Latina, acerca del mejoramiento genético de la caoba, cuyo objetivo principal ha sido la identificación y clonación de genotipos superiores de esta especie, con características de rápido crecimiento y con una excelente forma de fuste [12]. El proyecto de mejoramiento genético de la caoba, se ha complementado con el desarrollo de métodos silviculturales para atacar el problema generado por el barrenador del tallo de las meliáceas (*Hypsipyla grandella*) y también ha logrado desarrollar un paquete tecnológico para el manejo de plantaciones forestales en sus primeros 4 años [12].

De acuerdo con lo expuesto por [13], es importante que, en los potenciales programas de extensión y desarrollo de paquetes tecnológicos para plantaciones comerciales con clones de caoba, exista información técnica acerca de las características y las propiedades de su madera a edad temprana. Desde el punto de vista financiero, el proyecto de mejoramiento genético del INISEFOR, requiere tener las bases de calidad de la madera en pie de los mejores clones a edades tempranas, para así poder determinar el potencial valor económico de los raleos. Además de lo anterior, y desde la perspectiva tecnológica, es relevante conocer las características maderables de los clones, para que, a partir de esta información, se puedan desarrollar otros estudios con el objetivo de determinar los potenciales usos de los productos provenientes de raleos de plantaciones comerciales y determinar los procesos de transformación tecnológica requeridos.

Si bien existen estudios relacionados con las propiedades de *S. macrophylla*, la información disponible sobre las propiedades de la madera es escasa. Por lo tanto, es necesario generar conocimiento sobre su comportamiento en plantaciones establecidas con árboles clonados. Dado este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar las propiedades de la madera y establecer un ranking de selección de 8 clones de *S. macrophylla* a una edad de 9 años, creciendo en la zona atlántica de Costa Rica, considerando parámetros de crecimiento del árbol (diámetro, altura total, volumen), calidad del tronco y las siguientes propiedades de la madera: porcentaje de duramen, módulo de elasticidad dinámica en dirección transversal y longitudinal, densidad de la madera en estado verde y gravedad específica. El conocimiento de estas variables, permitirá potencializar al máximo el

programa de mejoramiento genético de esta importante especie nativa del país, con la información generada sobre las propiedades de la madera.

Las preguntas de investigación que se pretendieron abarcar con este estudio fueron: **¿Cuáles características poseen los clones seleccionados en cuanto a la calidad del tronco y propiedades de la madera de los árboles en pie?, y ¿Cuáles son los mejores clones con respecto a su crecimiento, propiedades de la madera y calidad del tronco?**

2.3. Objetivos específicos

1. Determinar las variables de densidad verde, peso específico básico, porcentaje de duramen y módulos de elasticidad dinámica de la madera de árboles en pie de ocho clones de Caoba de 9 años de edad.
2. Valorar la calidad del árbol, en función de la fisonomía externa del fuste de los clones seleccionados.
3. Determinar por medio de las propiedades de la madera en pie y las características de calidad del árbol, los mejores clones de los seleccionados para el estudio.

2.4. Marco teórico

2.4.1. Alcances en la investigación de la madera de *S. macrophylla*

En Costa Rica, *S. macrophylla* se ha introducido en programas de reforestación para la producción de trozas para aserrío y para la recuperación de sitios abandonados [14]. Recientemente se han sembrado series de ensayos de diferentes clones, donde se ha evaluado su crecimiento, productividad e incluso costos asociados a la reforestación con esta especie [15], [16], [17]. Además, las trozas de árboles de plantaciones forestales han mostrado buena calidad para el aserrío, así como secado rápido y buena trabajabilidad [18].

Un aspecto a destacar de estos estudios, es que se centran principalmente en el análisis de las propiedades morfológicas de los árboles, y se carece de estudio de las propiedades de la madera. Estudios de [19] y [20] señalan la importancia de las propiedades

físicas y químicas de la madera en el mejoramiento genético, indicando que estas presentan altos controles genéticos que deben ser utilizados en la selección de los mejores genotipos como carácter de crecimiento integral. En un estudio elaborado por [21] señalan que las propiedades físicas de la madera muchas veces vienen dadas por una sola ruta biosintética, poco influenciada por el medio ambiente. Así, las propiedades de la madera mostrarían un mayor control genético que los rasgos de crecimiento, debido a que estos últimos están más influenciados por el ambiente [21].

Los estudios de madera de plantación son extensos en *S. macrophylla*, estos contemplan caracterización general de la madera [22]-[25], variación en las propiedades de la madera [26]-[28], diferencias entre plantaciones de madera pura y mixta con madera de árboles de bosques naturales [29]-[31], efecto de la tasa de crecimiento [32], efecto de la edad [33],[34], y su comportamiento en procesos industriales [35].

En cuanto al análisis de aspectos genéticos sobre las propiedades de la madera, los estudios son limitados [36],[37]. En Filipinas, [36] además de examinar algunas variaciones genéticas en los rasgos de crecimiento y forma de las progenies de 73 familias de seis fuentes de semillas de plantaciones a los 50 meses de edad, examinaron la gravedad específica y encontraron que esta propiedad de la madera presentaba una heredabilidad moderada ($h^2 = 0,30$). En el estudio de [37] analizaron la variación genética de los rasgos de crecimiento y calidad de la madera de 96 familias, originarias de siete poblaciones (razas locales) en la isla de Java, plantaron una prueba de pro genie en Indonesia y encontraron que la heredabilidad familiar para todos los rasgos de crecimiento y calidad de la madera se clasificaron en alta heredabilidad. Además, los mismos autores encontraron que la simulación de selección mostró que el porcentaje de selección del 44,68 % (45 mejores familias) dio la ganancia genética óptima en función de los rasgos de crecimiento y calidad de la madera. Finalmente, en el estudio de [38] encontraron que la progenie diferente no era significativa en la gravedad específica en árboles de 7-8 años.

Recientemente, en [39] evaluaron y determinaron la heredabilidad de 9 clones de *S. macrophylla* a los 8 años sembrados en Costa Rica, considerando los parámetros de crecimiento arbóreo, propiedades físicas y mecánicas, color de la madera, calidad de la

madera aserrada y seca y propiedades de trabajabilidad. Los resultados mostraron que la heredabilidad fue $\hat{h}^2 > 0,30$ para el diámetro de árbol y diámetro de duramen, y en relación a la calidad de la madera después del aserrado y secado, no fue posible observar una tendencia clara en la calidad de la madera en relación al clon, probablemente influenciada por la edad temprana a la que se evaluaron los clones y no expresa el efecto genético de cada clon.

2.4.2. Características físicas y mecánicas de la madera

De acuerdo con [40] entre los materiales de construcción, la madera presenta un patrón ortotrópico, debido a que en su estructura interna cuenta con direcciones biológicas en tres ejes (longitudinal, tangencial y radial). Sotomayor [41] aclara que las propiedades tecnológicas de la madera, le permiten tener un comportamiento elástico lineal, macroscópicamente homogéneo, con propiedades de medio continuo y con simetrías materiales y elásticas de carácter ortotrópico.

Debido a la acción de la variabilidad genética, el factor ambiental, o la combinación de ambos, las características o propiedades de la madera varían a nivel de especies y dentro un mismo individuo, [42], [43].

En plantaciones forestales, las propiedades intrínsecas de la madera que determinan su calidad, también son afectadas por las prácticas silvícolas [44]. Según [45] la silvicultura ofrece posibilidades de mejora en la calidad de la madera, permitiendo ajustar sus propiedades a los requerimientos demandados por el mercado industrial.

2.4.3. Densidad de la madera

En el trabajo de Zobel y Talbert [46] mencionan que el estudio de la densidad tiene importantes ventajas para la calificación del uso sólido y estructural de la madera. En el caso del peso específico básico de la madera, el cual se basa en la estimación del peso seco al horno que corresponde a un volumen de madera verde, este es uno de los valores más usados para comparar las propiedades de la madera entre las distintas especies forestales. De acuerdo con [43] el término “básico”, es aplicado porque el volumen verde y el peso seco son constantes y de fácil reproducción en la madera.

Según [47], la madera se establece en tres categorías de acuerdo a su peso específico. En el **Cuadro 1** se muestran las categorías de clasificación de madera por su peso específico:

Cuadro 1. Clasificación de la madera por el peso específico.

Categoría	Valor
Madera liviana	< 0,40
Madera moderadamente pesada	0,40 – 0,75
Madera pesada	> 0,75

Fuente: International Association Wood Anatomist (IAWA) [47].

De acuerdo con lo expuesto por [48] la densidad o peso específico de la madera es una de las características más importantes, ya que se relaciona con un uso definido o potencial y puede indicar el comportamiento de su resistencia y otras características fisicomecánicas. Otro aspecto destacado por [48] es que generalmente altos valores de densidad se asocian con altas resistencias mecánicas y a mayores valores energéticos, debido a que esta variable se relaciona directamente con el contenido de celulosa.

Además, las variaciones que se dan en la densidad de forma intraespecífica se relacionan por cambios estructurales y químicos que ocurren principalmente por factores como la edad, genotipo, la respuesta a factores edafoclimáticos, entre otros, [49]. Otras variaciones de la densidad de la madera a lo interno del árbol, se dan en los sentidos anisotrópicos (longitudinal y transversal) y debido a las diferencias en el contenido de humedad entre la albura y el duramen [46].

En un estudio sobre evaluación de plantaciones forestales de especies nativas en Costa Rica elaborado por [50] verificaron que la gravedad específica es considerada la propiedad que define el rendimiento mecánico de la madera de estas especies e influye en su resistencia durante los procesos industriales.

2.4.4. Duramen

En el xilema de los árboles, la albura es la capa más joven y externa, mientras que el duramen está conformado por capas internas de células y fibras endurecidas (no

conductoras) que aumentan la resistencia del tallo y ayudan en el sostén de peso adicional [51]. La diferencia de la albura a duramen es apreciable por el cambio de color u oscurecimiento, ya que varias sustancias como aceites, gomas, resinas, taninos, entre otras, se infiltran en este tejido [52]. La proporción de este tejido es empleado en la caracterización de calidad de la madera de diferentes especies, junto con otras características como: el tipo de grano, el color, la textura, el olor, sabor, presencia o ausencia de anillos de crecimiento, entre otras [53].

2.4.5. Módulo de elasticidad dinámico de la madera

Otra propiedad relacionada con la calidad en la madera, considerada como una característica mecánica de la misma, es el módulo de elasticidad dinámico, el cual mide la rigidez de este material. Según [40] el efecto de la orientación angular de las fibras en el módulo elástico es la causa fundamental de la anisotropía en la madera y es responsable de los cambios en la tensión y valores de las constantes elásticas de la madera. Para determinar esta propiedad de la madera, se hace uso de técnicas no destructivas que miden la velocidad de propagación de una onda de tensión generada por un impacto mecánico [44].

Este factor varía con la edad y posición de la pieza en los árboles [54]. Las variaciones en las trozas se dan porque existen características de la madera juvenil que cambian con respecto a la madera madura presente [55], así sus longitudes de ondas varían de un tipo de madera a otro [56].

2.4.6. Calidad del fuste del árbol para aserrío

En el proceso de aserrío de la madera en rollo y la obtención de productos, los defectos de la madera conllevan una pérdida del rendimiento [57]. Debido a lo anterior, algunas investigaciones como la efectuada por [58] establecen la idea de que la silvicultura de cualquier especie debe avocarse a la valoración de la calidad de la madera para establecer plantaciones comerciales y a la obtención de productos de calidad.

De acuerdo con [59] la valoración de la calidad se enfoca en la identificación de problemas en la calidad y productividad de las plantaciones forestales con fines de aserrío. En

los últimos años, la necesidad de este tipo de evaluación y valoración de la calidad de plantaciones forestales, ha tomado gran importancia en el sector forestal costarricense, como herramienta para la comparación del manejo silvicultural de especies y de plantaciones.

Debido a lo anterior, en el país se ha venido desarrollando una metodología para la evaluación de la calidad de las plantaciones y que está en función de distintas variables para determinar el valor de la madera [60]. La evaluación de la calidad está basada en la determinación de la calidad del árbol completo o de sus primeras 4 trozas comerciales en diferentes categorías de calidad [61]. Esta metodología ha tenido especial aplicación en la valoración y comercialización de madera en pie, en la toma de decisiones y priorización de la cosecha forestal y principalmente para estimar a edad temprana, si la plantación rendirá comercialmente lo esperado [61].

Una premisa importante a tener en cuenta, es que la calidad de las plantaciones para una especie en particular, es el resultado de la combinación entre aspectos como la selección del sitio, el uso de material genético de calidad y el manejo silvicultural que se le brinda a la plantación [60].

2.5. Materiales y métodos

2.5.1. Descripción del sitio de estudio

Se llevó a cabo un muestreo en un ensayo clonal de 2 hectáreas de extensión, ubicado en la región Huétar Atlántica de Costa Rica, en el distrito La Colonia (N10°15'46,0879" y W83°49'14,23740") del cantón de Pococí, perteneciente a la provincia de Limón-Costa Rica (**Figura 1a**). El ensayo pertenece al Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y se estableció en diciembre de año 2010. Al momento del muestreo en el año 2019, el ensayo tenía una edad de 9 años. En la **Figura 1b**, se muestra el aspecto general del ensayo clonal al momento del muestreo. En este sitio se presenta una precipitación promedio anual superior a 4500 mm, una temperatura media anual de 24,4 °C y no presenta una época seca definida [62].

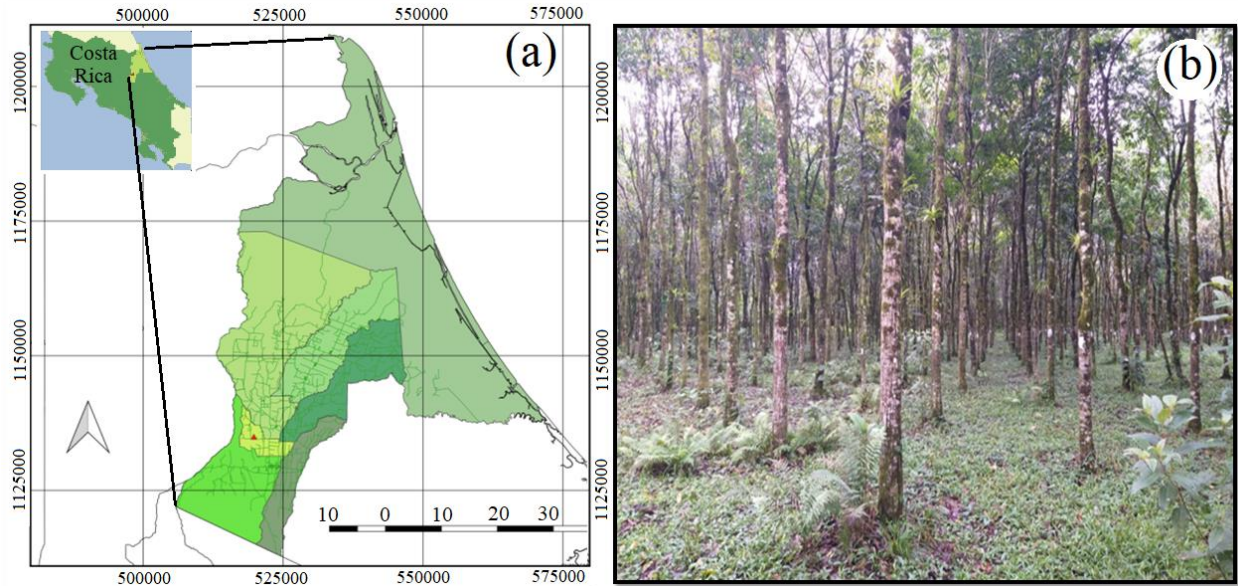


Figura 1. Ubicación y aspecto del ensayo de clones de *Swietenia macrophylla* (King) (caoba) de 9 años, Inisefor-UNA, Limón-Costa Rica.

2.5.2. Características del ensayo clonal

El ensayo se estableció en un diseño de cinco bloques incompletos al azar de 580 árboles cada uno, en donde cada bloque se compone de 116 clones y un testigo de árboles de semilla. Cada clon dentro del bloque se repitió en 5 ocasiones dispuestos en parcelas en línea y con un espaciamiento de 3 m x 3 m entre árboles [15].

Desde su establecimiento, el ensayo clonal ha recibido prácticas silviculturales como limpieza y control de malezas una vez por año y también recibió un único control químico fitosanitario contra el barrenador *Hypsipyla grandella* (Zeller) en el primer año. Además, desde su establecimiento, el ensayo clonal se ha medido periódicamente, con el fin de monitorear el desarrollo de los clones, familias y procedencias, en cuanto a las variables altura total, diámetro a la altura de pecho (DAP) y volumen.

2.5.3. Selección de los clones

Los clones de caoba a estudiar, fueron seleccionados a criterio experto por parte de los encargados del proyecto de mejoramiento genético de la caoba del INISEFOR, debido a que de los 116 genotipos (clones) establecidos en la plantación, solo ocho de ellos han

mostrado el mejor desempeño en variables dasométricas como diámetro (mayor a 12 cm), altura, calidad del tronco y resistencia a plagas y enfermedades, en evaluaciones anteriores. Las procedencias de clones fueron cuatro de Costa Rica y cuatro de Bolivia.

2.5.4. Determinación de calidad del árbol en pie de los clones seleccionados

De los clones evaluados, se seleccionaron al azar tres individuos por cada repetición y por cada bloque y se les aplicó la metodología de determinación de la calidad propuesta por Murillo y Badilla [63] y Murillo [61]. La evaluación en campo consistió en la valoración individual de la calidad de cada una de las trozas de 1,5 m de longitud que conforman el árbol desde la base (0,30 m) y hasta la altura comercial, en cuatro categorías establecidas (**Cuadro 2**). A cada árbol muestreado se le midió el DAP (1,30 m desde el suelo), la altura comercial (cantidad de trozas posibles de 1,5 m).

Cuadro 2. Descripción de los criterios para establecer la calidad de las trozas para aserrar en árboles en pie de los clones seleccionados de *Swietenia macrophylla* (King) (caoba) de 9 años, Inisefor-UNA, Limón-Costa Rica.

Categorías de calidad	Descripción
1	Son trozas excelentes para su aprovechamiento, completamente rectas o con leves torceduras, sin inclinación, sin ramas gruesas y con ausencia de daño por problemas fitosanitarios.
2	Son trozas con defectos leves para su aprovechamiento, con el fuste inclinado levemente, con leves problemas de rectitud, sin ramas gruesas y con ausencia de daño por problemas fitosanitarios.
3	Son trozas con limitaciones para su aprovechamiento, que permiten aprovechar al menos un 50 % de su volumen, con el fuste inclinado o con problemas de rectitud, con ramas gruesas y con alguna evidencia de daño por problemas fitosanitarios.
4	Son trozas que no poseen características aptas para aprovecharse con el aserrío, con el fuste inclinado o con serios problemas de rectitud, bifurcaciones, con ramas gruesas y con problemas fitosanitarios, son trozas que pueden usarse para biomasa o leña.

La calidad general del árbol completo se determinó utilizando un índice que pondera la calidad de cada una de sus primeras cuatro trozas, según su ubicación en el árbol, a través de los siguientes algoritmos de calificación detallados en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Ecuaciones para la clasificación general de árboles utilizando las cuatro primeras trozas para aserrar en árboles en pie de los clones seleccionados de *Swietenia macrophylla* (King) (caoba) de 9 años, Inise-for-UNA, Limón-Costa Rica.

# de trozas de aserrío en el árbol	Ecuación para la calidad del árbol
1	Calidad troza 1*1
2	Calidad troza 1*0,6+calidad troza 2*0,4
3	Calidad Troza 1*0,40+calidad troza 2*0,30+ calidad troza 3*0,22
4	Calidad Troza 1*0,45+calidad troza 2*0,33+ calidad troza 3*0,2+ calidad Troza 4*0,1

El valor de calidad del árbol completo se convirtió en una variable continua, con valores desde 1 hasta 4, en los que 1 representa el valor máximo de calidad. Finalmente, la calidad del árbol se transformó de la escala original (de 1 a 4) y se reportó como porcentaje (**Ecuación 1**). Luego se promedió la calidad del árbol de cada árbol evaluado por clon.

$$Calidad \% = 100 * \left[1 - \left(\frac{calidad\ general - 1}{3} \right) \right] \quad (1)$$

2.5.5. Muestreo y determinación de las propiedades de la madera

De cada uno de los clones seleccionados, se muestrearon al azar dos árboles por cada repetición y en cada bloque (un total de diez árboles por clon en el ensayo o un total de 80 individuos totales en el ensayo). Aunque la selección fue al azar, los árboles elegidos debían ser individuos vivos y con al menos una sección de fuste de 2,5 m a partir de la

base (0,30 m desde el suelo). A cada árbol elegido se le midió la velocidad de ultrasonido de las secciones transversal a la altura del DAP y longitudinal del fuste en su primera troza y se extrajo una muestra de madera de la sección radial del DAP en su lado este.

Para la extracción de las muestras de madera, se utilizó un método no destructivo que consistió en el uso del barreno Pressler de 5 mm de diámetro. Las extracciones de las muestras de madera se realizaron a la altura del DAP (1,30 m de altura de los árboles en pie) y abarcaron una longitud de perforación en el fuste igual al radio del DAP. Una vez extraídas las muestras con el barreno se depositaron en pajillas plásticas selladas y rotuladas para posteriormente conservarlas en una cámara de humedad saturada y así evitar la pérdida drástica de humedad. Las muestras de madera se procesaron en el Laboratorio de Dinámica y Restauración de Ecosistemas de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional y se utilizaron para la determinación de la densidad verde, el peso específico básico y el porcentaje de duramen de la madera de cada uno de los individuos seleccionados.

Determinación del módulo de elasticidad dinámico

Estos parámetros se determinaron de acuerdo con los métodos propuestos por [64]. Primero se eliminó el tejido de la corteza del árbol en pie y se midió el tiempo de ultrasonido en las direcciones longitudinal y radial usando un equipo de ultrasonido SYLVATEST-DUO con transductores de 22 kHz. Para la medición de la velocidad de ultrasonido, se marcó el lado norte del árbol en pie y se obtuvieron los tiempos de propagación del pulso de ultrasonido en las direcciones longitudinal y transversal. El tiempo de propagación del pulso de ultrasonido longitudinal se determinó en los lados del árbol que miran al norte y al sur y se midió en una sección de 130 cm de largo, desde 30 cm sobre el nivel del suelo hasta una altura de 160 cm con las sondas inclinadas a 45 grados. En la dirección transversal, el pulso de ultrasonido se midió a la altura del pecho (DAP) en dirección nortesur y oeste-este con las sondas a un ángulo de 180° con respecto al eje del fuste. Finalmente, la velocidad de ultrasonido se calculó por su tiempo de propagación en la madera (**Ecuación 2**), mientras que el módulo elástico dinámico longitudinal y transversal en árboles en pie, se derivaron de la **Ecuación 3**. En esta ecuación, la densidad de la madera se midió por la muestra de tarugo extraída al DAP, que se detalla posteriormente.

La densidad de la madera considerada en estos cálculos fue la densidad de la madera en estado verde.

$$V = L / \left(\frac{T}{1000000} \right) \quad (2)$$

$$ModED = V^2 \times d \times 10^{-6} \quad (3)$$

Donde: V = velocidad de ultrasonido en m s⁻¹, L = longitud de la muestra en metros, para la sección transversal representada en DAP y para las direcciones longitudinales representadas en 1,3 metros, T = tiempo requerido por la propagación del pulso ultrasónico para viajar de un extremo al otro de la placa en μs, ModED = módulo de elasticidad dinámico en Gpa y d = densidad de la madera en estado verde en kg/m³.

Densidad verde

Para determinar la densidad verde de la madera, se utilizaron las muestras obtenidas con el barreno Pressler de 5 mm de diámetro. Estas muestras se pesaron en una balanza de precisión (0,001 g) y posteriormente, se les determinó su volumen por el método del desplazamiento de agua. La fórmula para la determinación de la densidad verde se presenta en la **Ecuación 4**.

$$D = M / Vol \quad (4)$$

Donde: D = densidad de la madera verde en gr/cm³, M = masa de la muestra de madera en gramos y Vol = Volumen de la muestra de madera en cm³.

Peso específico básico de la madera

Una vez obtenida la densidad verde, las muestras de madera se secaron al horno a 102 °C por 72 horas para eliminar el agua de sus tejidos, alcanzar un peso constante y determinar nuevamente su peso en estado seco. Para determinar el PEB de las muestras de madera se utilizó el método gravimétrico expresado por la **Ecuación 5**.

$$PEB = \frac{m}{\frac{V}{\rho_{agua}}} \quad (5)$$

Donde: PEB = peso específico de la madera (g/cm^3), m = masa de la madera seca (g), V = volumen de la madera verde (cm^3) y p agua = $1,00 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Porcentaje de duramen

Para determinar el porcentaje de duramen, se colocaron las muestras de madera de 5 mm de diámetro sobre una tabla con biseles de aproximadamente $\frac{1}{3}$ del grueso de estas y se fijaron con pegamento (**Figura 2a**). Posteriormente, se llevó a cabo un lijado con diferentes granos sobre las muestras para evidenciar sus tejidos internos (**Figura 2b**). Posteriormente, a las muestras lijadas se les aplicó azul bromofenol con brocha en la superficie plana, como técnica colorimétrica de diferenciación de tejidos, de acuerdo con la metodología propuesta por [65] y así lograr una diferenciación visual entre la albura y el duramen. Con la técnica colorimétrica aplicada, se logró que el duramen se tiñera con una tonalidad de color oscura, mientras que la albura quedara con un color más claro (**Figura 2c**). Finalmente, con un vernier digital se midió la longitud del radio de duramen de cada muestra y se determinó el porcentaje de duramen como la relación entre la longitud total del diámetro de duramen de la muestra de madera seca, en relación con el DAP con corteza del árbol (**Ecuación 6**).

$$\%D = \left(\frac{L1}{L2}\right) * 100 \quad (6)$$

Donde: %D = porcentaje de duramen de la muestra de madera, L1 = longitud del diámetro de duramen en centímetros, cuyo valor se obtuvo multiplicando por 2 el radio de duramen de la muestra de madera extraída en la sección transversal al DAP, y L2 = DAP con corteza del árbol en pie en centímetros.



Figura 2. Aspecto de las muestras de madera seca de los clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años, para la diferenciación del duramen. A = muestra de madera seca sin tratar, B = muestra de madera seca lijada y C = muestra de madera seca teñida para la diferenciación de tejidos.

2.5.6. Índices de selección de los mejores clones

Para la selección de los mejores clones se utilizaron dos índices de selección: el primero (**IS1**) consideró parámetros de crecimiento (volumen total) y propiedades de la madera (módulo elástico dinámico longitudinal en árboles en pie, porcentaje de duramen y gravedad específica) y en el segundo se consideró el volumen comercial y la calidad del árbol determinada en la **Ecuación 1**. Para el primer índice, a cada variable se le asignó un peso relativo de un 25%. Luego se calculó el índice de selección (**Ecuación 7**). Después de calcular el valor del índice para cada genotipo, se establecieron tres categorías. Estas categorías se establecieron al dividir por 3, la diferencia entre el valor más alto y más bajo de los índices obtenidos. El **Cuadro 4** muestra las categorías de selección, su rango y la descripción para cada una.

$$IS1 = VT * 0.25 + ModEDL * 0.25 + \%D * 0.25 + PEB * 0.25 \quad (7)$$

Donde: IS (1) = índice de selección 1, VT = volumen total, ModEDL = módulo de elasticidad dinámico en sentido longitudinal, %D = porcentaje de duramen y PEB = peso específico básico de la madera.

Cuadro 4. Valores y denominación de las categorías establecidas para clasificar los clones seleccionados de *Swietenia macrophylla* (King) (caoba) de 9 años, Limón-Costa Rica.

Categoría	Rango	Nombre de la categoría
1	40,99 – 42,48	Clones con propiedades de la madera de características aceptables.
2	39,49 – 40,99	Clones con propiedades de la madera de características medias a aceptables.
3	37,99 – 39,49	Clones con propiedades de la madera de características bajas.

En el segundo índice de selección (**IS2**) se consideró el volumen comercial y la calidad general de cada clon determinada en la **Ecuación 1**. En este índice, a cada variable se le asignó un peso relativo: 75% para volumen comercial y 25% para calidad del árbol, aplicando la **Ecuación 8**.

$$IS2 = \frac{0.75*VC - \bar{x}VC}{Desviaciónestándar(VC)} + \frac{0.25*Calidad - \bar{x}Calidad}{Desviaciónestándar(Calidad)} \quad (8)$$

Donde: IS (2) = índice de selección 2, VC = volumen comercial promedio de cada clon en m³, calidad = calidad general promedio de cada clon de 1 a 4, VC = promedio muestral del volumen comercial del conjunto de clones, y Calidad = promedio muestral de la calidad general del conjunto de clones.

El volumen comercial de cada clon, se estimó con la muestra de las mediciones efectuadas para la calidad, en donde la altura comercial es igual a la longitud de la cantidad posible de trozas de 1,5 m de largo para cada árbol y para la muestra de cada clon.

2.5.7. Análisis estadístico

Para la descripción estadística de las variables en estudio, se utilizaron tablas y gráficos con información descriptiva. Se verificó que las variables cumplieran con el supuesto de normalidad y de homogeneidad de las varianzas. Se llevó a cabo una transformación

logarítmica para la variable Módulo de elasticidad dinámico longitudinal. Para determinar las diferencias estadísticas entre las medias de las variables de los diferentes clones, se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples con la prueba de Tukey a un nivel estadístico de significancia (p) de 0,05. A las variables de densidad verde, peso específico básico y longitud de duramen se les aplicó la prueba no paramétrica de kruskal-wallis para determinar diferencias entre los clones. El análisis de varianza paramétrico y no paramétrico y las pruebas de comparación se realizaron utilizando el programa *InfoStat* 2020.

2.6. Resultados y Discusión

2.6.1. Evaluación de la calidad del tronco los árboles

Se evaluaron un total de 540 trozas de 1,5 m de longitud y distribuidas en 4 categorías de calidad entre los distintos genotipos evaluados (**Figura 3a**). De acuerdo con los datos de la evaluación, la calidad 1 en todo el conjunto de observaciones mostró un total de 188 trozas, lo cual representa un 35 % del total de trozas evaluadas. Las calidades 2, 3 y 4, estuvieron representadas por un total de 165, 30 y 157 trozas del total, representando el 30 %, 6 % y 29 % del total de observaciones, respectivamente.

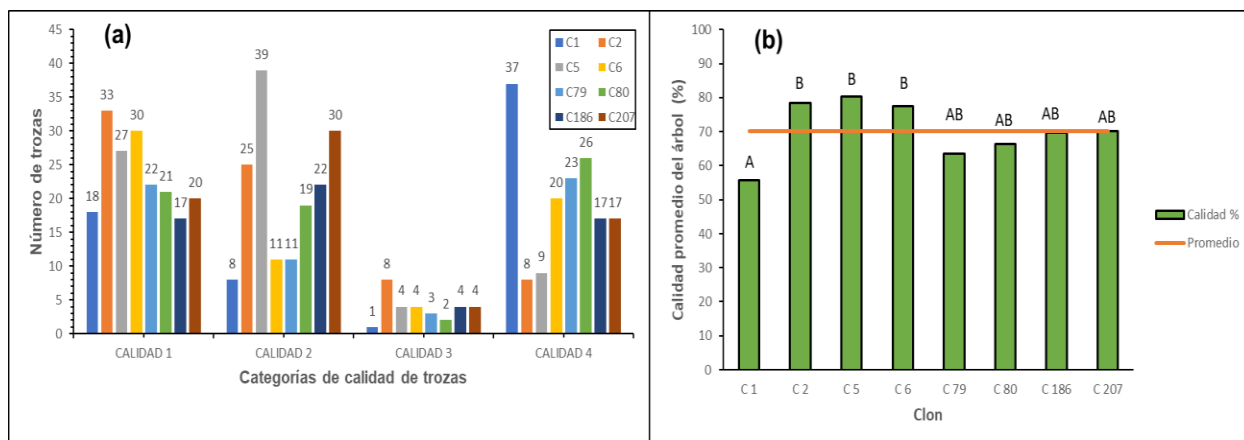


Figura 3. (a). Distribución del total de trozas de la muestra por categorías de calidad y (b) Variación del promedio de la calidad en porcentaje de los ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años, Limón-Costa Rica.

Nota: Letras diferentes en las distribuciones indican que existe diferencia estadística significativa entre los clones con la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).

Los clones 2 y 6 presentaron el mayor porcentaje de trozas en la categoría de calidad 1, con un 44,59 % (33 trozas) y 46,15 % (30 trozas) del total de observaciones para cada clon, respectivamente. Los clones 5 y 207 presentaron el mayor número de trozas de calidad 2, con un total de 39 trozas (49,37 % del total de observaciones) para el primero, seguido de 30 trozas (42,25 % del total de observaciones) para el segundo. Para todos los clones evaluados se encontró un bajo número de trozas de calidad 3, que se evidenció por el número de observaciones de cada clon, donde el clon 2 fue el que presentó el mayor porcentaje con un 10,81 % (8 trozas) y el clon 1 el menor porcentaje con 1,56 % (1 troza). En la categoría de calidad 4, el clon que mostró el mayor porcentaje de trozas por número de observaciones fue el clon 1 con un 57,81 % (37 trozas), mientras que el clon 2 mostró el porcentaje más bajo con un 10,81 % (8 trozas) en esa categoría.

Los valores porcentuales de la calidad, estimados para todo el conjunto de muestras de los clones, variaron en un ámbito de 33,33 % hasta el 100 %. Los valores de los promedios de calidad por clon oscilaron entre valores de 55,67 % para el clon 1 y 80,22 % para el clon 5. En promedio, la calidad presentó un valor del 70,24 % (desviación estándar de $\pm 17,83$) para todo el conjunto de clones evaluado. Los clones con los porcentajes de

calidad más altos por encima de la media general (70,24%), fueron los clones 5, 2 y 6 con valores de 80,22 %, 78,44 % y 77,41 %, respectivamente. En cuanto al clon 1, este fue el genotipo que mostró el porcentaje promedio de calidad más bajo del conjunto, con un valor de 55,67 % (**Figura 3b**).

Al evaluar estadísticamente el promedio de la calidad en porcentaje de los diferentes clones, se encontró que el clon 1 muestra diferencias significativas con los clones 2, 5 y 6, los cuales no presentaron diferencias entre sus medias. Por su parte, los clones 79, 80, 186 y 207, no presentaron diferencias estadísticas al comparar sus promedios de calidad.

A pesar de que Moya et al. [18], mencionan que por lo general el fuste de árboles de caoba provenientes de los primeros raleos en plantaciones forestales no es recto y las torceduras afectan por lo general la calidad del árbol, con los resultados obtenidos de la calidad promedio en porcentaje del conjunto de clones evaluado, se confirma que la mayoría presentaron un alto valor en esta variable, con porcentajes por encima de un 60 %.

También, es importante destacar, que a la plantación donde pertenecen los clones estudiados, únicamente se le realizó un control fitosanitario contra el barrenador del tallo de las meliáceas en el primer año, desde el establecimiento de la plantación, siendo lo recomendado y de acuerdo al manejo propuesto para los clones en el paquete tecnológico establecido por el equipo técnico del INISEFOR, un control de la plaga por un periodo que abarca los primeros años y hasta que los árboles superen los 8 m de altura, para escapar a su ataque [12]. Lo anterior podría haber influido en la no obtención de mejores resultados para la variable calidad, ya que esta plaga se caracteriza por atacar a las plantas en los primeros estadios de vida, induciendo a problemas como formación excesiva de ramas y malformación de fustes en los árboles [66].

2.6.2. Porcentaje de duramen (%D), peso específico básico (PEB) y densidad verde (DV)

En la **Figura 4** se puede observar la variación de las mediciones para las variables diámetro de duramen, porcentaje de duramen, densidad verde (DV) y peso específico básico (PEB), de los ocho clones seleccionados.

Para la variable diámetro de duramen, el coeficiente de variación entre todas las mediciones efectuadas a los clones fue de 16,04 %. Como se aprecia en la **Figura 4a**, existen diferencias significativas entre los promedios, variando con respecto del promedio general del conjunto, cuyo valor fue de 12,27 cm. Los clones 1 y 79, presentaron el valor promedio más alto y más bajo del conjunto, con valores de 13,58 y 9,82 cm de diámetro, respectivamente. De acuerdo con la comparación entre clones para esta variable y de acuerdo con el estadístico de Kruskal Wallis a un $\alpha=0,05$, el clon 2 y el 79 no presentaron diferencias estadísticas, pero éstos mismos sí mantienen diferencias significativas con los clones 1, 6, 80 y 207. Por su parte, el clon 2 no presentó diferencias estadísticas con el clon 5 y el clon 186.

El coeficiente de variación para la variable porcentaje de duramen de todos los clones evaluados fue de 8,07 %. Para esta variable, los valores promedio de los clones variaron desde 56,30 % hasta 63,64 %, en los datos pertenecientes al clon 79 y el clon 80, respectivamente. El valor promedio del porcentaje de duramen de los clones evaluados para este estudio fue de 59,64 % (**Figura 4b**). De acuerdo con los resultados de la prueba de Tuckey ($p < 0,05$), se considera que los clones 2, 5, 6, 79, 186 y 207, no presentaron diferencias significativas entre ellos, asimismo los clones 1 y 80. Sin embargo, para esta variable sí se encontraron diferencias significativas entre los clones 2, 6 y 79 con los clones 80 y 1.

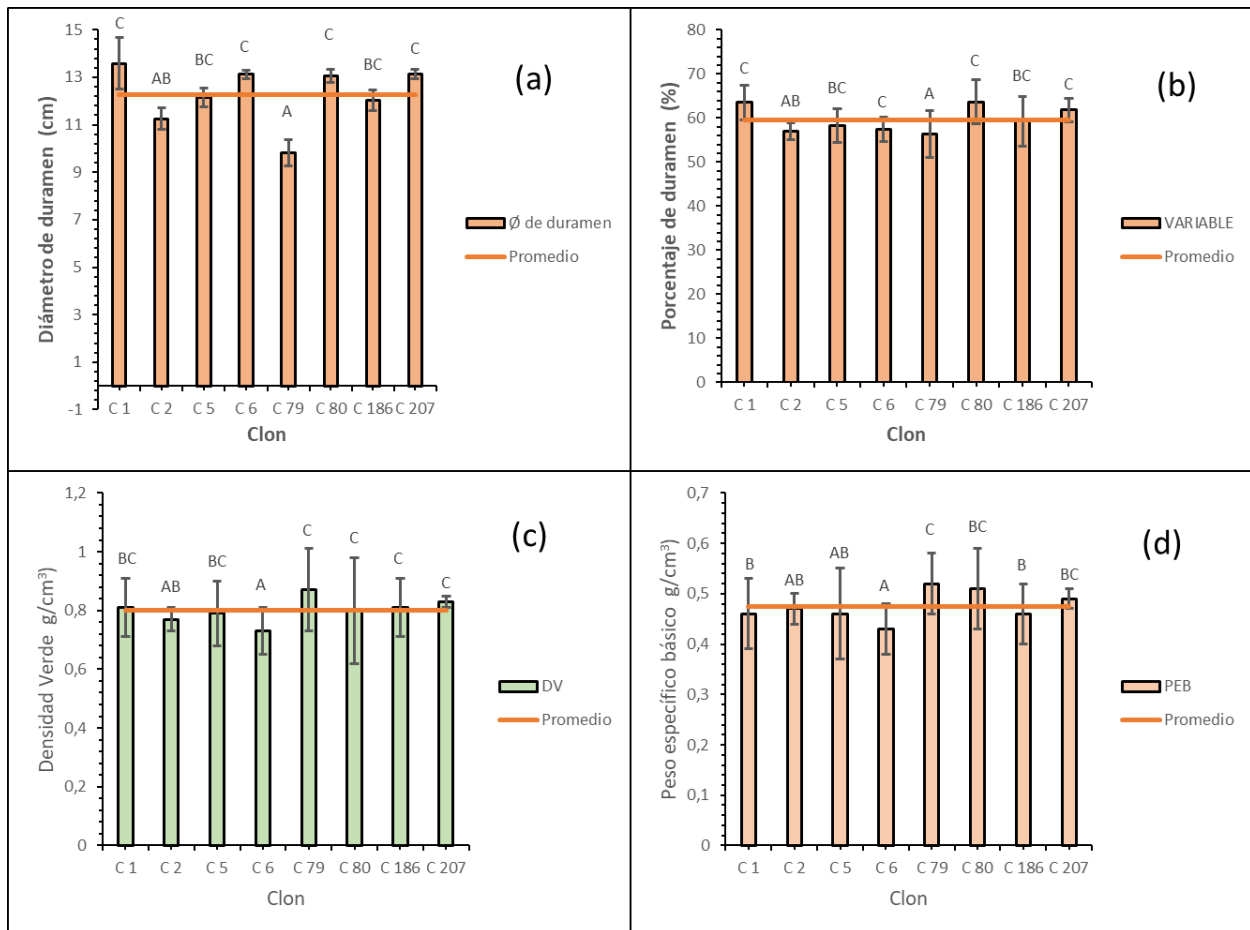


Figura 4. Variación de a) diámetro de duramen, b) porcentaje de duramen, c) densidad verde y d) peso específico básico de ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años, Limón-Costa Rica.

El valor promedio del porcentaje de duramen de los clones evaluados en este estudio (59,64 %), es superior en un 18,19% al reportado en la investigación realizada por [39] en 9 clones de *S. macrophylla* a los 8 años sembrados en la región Sarapiquí en Costa y en el que se reportó un valor promedio de esta variable a la altura del DAP de 50,46 %, para todo el conjunto de clones de caoba evaluado. Los resultados en esta investigación y en la realizada por [39] muestran que el porcentaje de duramen registrado a la altura del DAP de los clones de *S. macrophylla* a edades tempranas, son altos e indicarían buenas cualidades en cuanto al color de la madera y en aspectos como la durabilidad y la resistencia de la madera al ataque de hongos e insectos de las trozas provenientes de plantaciones, aspectos que influirían en su valor comercial [18], [67].

El valor del porcentaje de duramen, de un 89 % de duramen en la base de los árboles, reportado en el estudio elaborado por [26], en el que se evaluaron propiedades físicas, mecánicas y anatómicas de una muestra de árboles de caoba de 88 años con un DAP promedio de 39,85 cm y una altura total promedio de 17,20 m, confirma el alto porcentaje de este tejido para esta especie encontrado en los clones estudiados a la altura del DAP. A partir de lo anterior y para el caso de la variable porcentaje de duramen, [26] mencionan que *S. macrophylla* puede ser comparable con la especie *Tectona grandis* (L).

Otro aspecto importante en cuanto al porcentaje de duramen, es que a pesar de que para la especie *S. macrophylla* en plantaciones forestales [18] reportan que la diferenciación entre la albura y duramen es abrupta y clara en trozas extraídas de plantaciones forestales, para este trabajo se encontró que, en algunas muestras de madera extraídas a los clones a la altura del DAP, la diferenciación visual de los tejidos para la determinación del diámetro de duramen, no fue tan clara y definida. En relación con lo anterior, y en comparación con lo reportado para la especie *Tectona grandis* (L), según Bath [68], la dificultad en la diferenciación visual de los tejidos puede atribuirse al estado juvenil de los árboles, ya que presentan un duramen con tonalidades más claras que los que se pueden encontrar en árboles de mayor edad.

En cuanto a las variables DV y PEB, los promedios de estas variables según las mediciones efectuadas fueron de 0,80 g/cm³ y de 0,48, respectivamente y con valores del coeficiente de variación en las mediciones de todo el conjunto de clones de 13,53 % y 13,89 %, respectivamente.

El valor más alto en la DV lo presentó el clon 79 con 0,87 g/cm³ y el menor valor el clon 6 con 0,73 g/cm³ (**Figura 4c**). Para el caso del PEB, los coeficientes de variación se presentaron en un rango que va desde un 3.67 % para el clon 207, hasta un valor de 19.67 % en el clon 5. En cuanto a los valores promedio del PEB en los clones, al igual que para la variable DV, el valor más alto lo presentó el clon 79 con 0,52 y el más bajo lo mostró el clon 6 con 0,43 (**Figura 4d**).

Los resultados de la comparación de la DV entre los clones, por medio del estadístico Kruskal Wallis ($\alpha=0,05$) mostraron que los clones 2 y 6 no presentan diferencias significativas entre ellos, asimismo, los clones 1, 2 y 5, se mostraron estadísticamente sin

diferencias en esta variable. Sin embargo, los mismos clones 2 y 6, sí mantuvieron diferencias significativas en los valores de la DV con el resto de los clones evaluados.

Para la variable PEB al igual que la anterior y también a través de la prueba de Kruskal Wallis ($\alpha=0,05$), se determinó que estadísticamente los clones 2,5 y 6 no presentaron diferencias significativas entre ellos, de igual forma entre los clones 1, 2, 5, 80, 186 y 207. Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas entre el clon 6 con los clones 1, 79, 80, 186 y 207.

Los valores promedios de la DV y PEB que se encontraron para este estudio, son iguales a los que se obtienen en el estudio realizado por [39]. Los valores resultantes en este estudio para las dos variables citadas, también se asemejan a lo reportado para especies de árboles del trópico húmedo como *Calophyllum brasiliense* Cambess. (Cedro María) y *Carapa guianensis* Aubl. (Caobilla), de las cuales se señalan usos y propiedades de la madera, cuyas características las hacen ser sustitutas ideales de la madera de caoba [53].

Específicamente, en cuanto a la variable PEB, el valor promedio de los clones de caoba encontrado en este estudio (0,48), es comparable con los reportados en la madera proveniente de plantaciones forestales de otras especies como *Hieronyma alchorneoides* Allemão (Pilón) y la especie *Terminalia oblonga* (Ruiz y Pav.) Steud (Surá) cuyos valores son de 0,50 y 0,55, respectivamente [18]. De acuerdo con la clasificación propuesta por Hess et al., citado en Moya et al. [69], el valor promedio general del PEB de los clones de caoba estudiados, clasificaría su madera como moderadamente pesada.

2.6.3. Variación del módulo de elasticidad (ModED) dinámico de la madera

En el **Cuadro 5** y la **Figura 5** se presentan los resultados para el módulo de elasticidad dinámico transversal (ModEDT) medido a la altura del DAP y para el módulo de elasticidad dinámico longitudinal (ModEDL) de la primera troza, en los genotipos seleccionados. Se puede observar que los valores promedios del ModEDT de los clones presentaron altos valores en el coeficiente de variación, valores que van desde 15,64 % para el clon 2 hasta 35,24 % en las mediciones para el clon 80. El valor promedio del ModEDT de todos los clones es de 2367,9 MPa, mientras que el coeficiente de variación de todas las

mediciones entre clones fue de 27,70 %. Los valores de las mediciones del ModEDT en la madera en pie oscilaron entre valores de 888,7 MPa para el clon 6 y 4188,9 MPa para el clon 5. Además, se puede observar que existen diferencias significativas en los promedios de las mediciones efectuadas en los dos sentidos cardinales medidos y en el valor total promedio del ModEDT de los clones. Al evaluar el promedio de los diferentes clones, se observa que el clon 6 mantiene diferencias significativas con los clones 1 y 79. Los valores promedio más altos están dados para los clones 1 y 79, mientras que el clon 6 presentó el valor más bajo, con valores de 2795,5, 2914,2 y 1712,1 MPa, respectivamente.

Cuadro 5. Variación del módulo de elasticidad dinámico transversal a la altura del DAP y del módulo de elasticidad dinámico longitudinal de ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años, Limón-Costa Rica.

Clon	ModED Transversal (MPa)			ModED Longitudinal (MPa)
	Sentido Este-oeste	Sentido Norte-sur	Promedio	
1	2840,1 ^A (32,12)	2750,9 ^B (20,85)	2795,5 ^B (22,31)	2478,6 ^{AB} (69,90)
2	2301,6 ^{AB} (15,03)	2411,8 ^{AB} (20,86)	2356,7 ^{AB} (15,64)	3841,4 ^{AB} (60,17)
5	2431,5 ^{AB} (30,98)	2271,6 ^{AB} (34,32)	2351,5 ^{AB} (32,14)	2864,2 ^{AB} (57,82)
6	1680,0 ^A (25,94)	1744,3 ^A (23,26)	1712,1 ^A (20,23)	1634,0 ^A (58,19)
79	2864,6 ^B (21,89)	2963,7 ^B (31,16)	2914,2 ^B (25,23)	4248,4 ^B (41,46)
80	2260,0 ^{AB} (40,32)	2157,5 ^{AB} (32,48)	2208,8 ^{AB} (35,24)	3014,8 ^{AB} (73,88)
186	2232,8 ^{AB} (16,85)	2396,9 ^{AB} (21,83)	2314,9 ^{AB} (18,69)	3661,9 ^{AB} (44,76)
207	2297,7 ^{AB} (22,61)	2281,7 ^{AB} (18,47)	2289,7 ^{AB} (18,39)	1826,7 ^A (31,42)
Promedio general	2363,6	2372,3	2367,9	2946,3

Nota: Los valores entre paréntesis representan el coeficiente de variación. Letras diferentes en la misma columna del promedio indican diferencias significativas con la prueba de Tukey a un valor de $p < 0,05$.

En las mediciones del ModEDL se registraron valores que varían entre 403,7 MPa y 7170,0 MPa, en donde el valor más bajo correspondió al clon 6 y el valor más alto al clon 2. El promedio general de todas las observaciones de la variable ModEDL es de 2946,3 MPa y valor del coeficiente de variación de las mediciones efectuadas entre los distintos clones fue de 62,72 %. El clon 79 presentó el valor promedio más alto entre los clones, mientras que el clon 6 presentó el valor promedio más bajo, con valores de 4248,4 y 1634,0 MPa, respectivamente. De acuerdo con los datos, el ModEDL de los clones evaluados presenta altos valores en el coeficiente de variación, entre 31,42 % para el clon 207 y 73,88 % en el clon 80. Para esta variable también es posible observar que existen diferencias significativas entre los valores medios de los clones 6 y 207 con el clon 79.

A pesar de que se encontraron diferencias en cuanto a la variabilidad de las mediciones para el ModED en los sentidos transversal y longitudinal, se observa que el clon 79 obtuvo los valores más altos en ambos sentidos, lo que indica un alto grado de resistencia en su madera. En un estudio efectuado por [64], en el que se utilizó la misma metodología para la medición del ModED en árboles en pie de un conjunto de clones de *Gmelina arborea* de 4 años, también se encontraron diferencias en los valores para los dos sentidos, transversal (rango de valores de 269,1 a 4758,0 MPa) y longitudinal (rango de valores de 50,9 a 9886,8 MPa) y una alta variabilidad en el conjunto de observaciones para esta variable. Complementariamente, en el mismo estudio de [64] se encontró un valor promedio del ModED en el sentido transversal (2537,7 MPa) similar al encontrado para el conjunto de clones de caoba y un valor promedio inferior en sentido longitudinal (1220,4 MPa).

Al comparar los valores para ambas variables, se puede observar que la variable ModEDL presenta una mayor desviación estándar que los valores resultantes en el sentido transversal para los árboles en pie de todos los clones evaluados (**Figura 5**). En la actualidad, no existen estudios de medición del módulo de elasticidad dinámico de la

madera de árboles en pie en clones de caoba a edades tempranas, por lo que se puede inferir que la alta variabilidad expresada en los coeficientes de variación de los datos en ambos sentidos anisotrópicos, se deba en parte al efecto del método de medición indirecto que hace que se den variaciones debido en parte al grado de inclinación y profundidad de los traductores del equipo de ultrasonido que se utiliza. Además, otros factores que pueden afectar la transmisión de la onda de ultrasonido a través del fuste de los árboles en pie en ambos sentidos son la temperatura ambiental que afecta la velocidad de la onda, el tamaño de los árboles (circunferencia), la presencia de nudos y tejidos de crecimiento y el contenido de humedad de la madera [70], [71], [72] y [73].

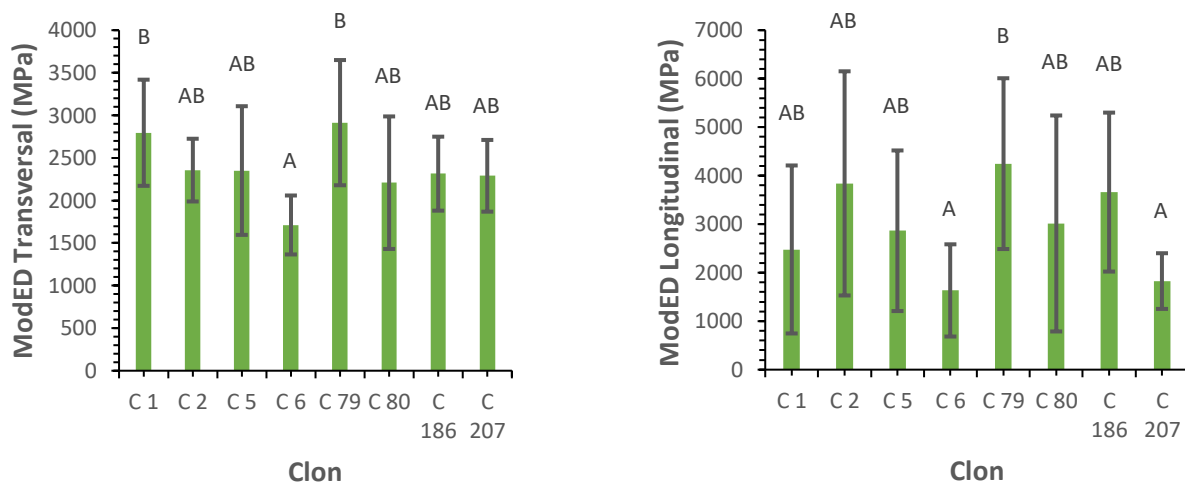


Figura 5. Distribución de los valores promedios y de la desviación estándar del ModEDT y ModEDL de ocho clones seleccionados de *S. macrophylla* de 9 años, Limón-Costa Rica

Cabe señalar que es difícil analizar en profundidad el ModEd para la madera de árboles en pie de los clones de caoba, debido en parte a la escasez de estudios prácticos que estiman la calidad de la madera bajo esta misma técnica de medición indirecta y a que la mayor parte de estudios se han basado principalmente en especies forestales de rápido crecimiento y han utilizado técnicas destructivas y muestras con algún nivel de procesamiento en laboratorio. Además, es importante anotar que, a pesar de la alta variabilidad encontrada con el método indirecto de medición empleado, Wang *et al.* [74] mencionan que la estimación de la resistencia por medio de métodos indirectos en árboles

en pie es de ayuda para conocer las diferencias en ensayos genéticos de acuerdo con cualidades específicas, lo que ayuda a predecir la calidad de la madera en el árbol en pie y colaborando con los procesos de toma de decisiones en el manejo forestal.

2.6.4. Selección de los mejores clones

Los resultados de la selección de clones basados en categorías, demostraron que los mejores clones son los del grupo conformado por los clones 80, 2, 186 y 79, que se posicionaron en la categoría 1 (**Figura 6a**), los cuales son superiores por su relevancia en cada una de las variables de selección definidas (**ver Ecuación 7**). En la categoría 2 se posicionaron los clones 5 y 1 y en una tercera categoría de selección, se encuentran los clones 207 y 6 (**Figura 6b**).

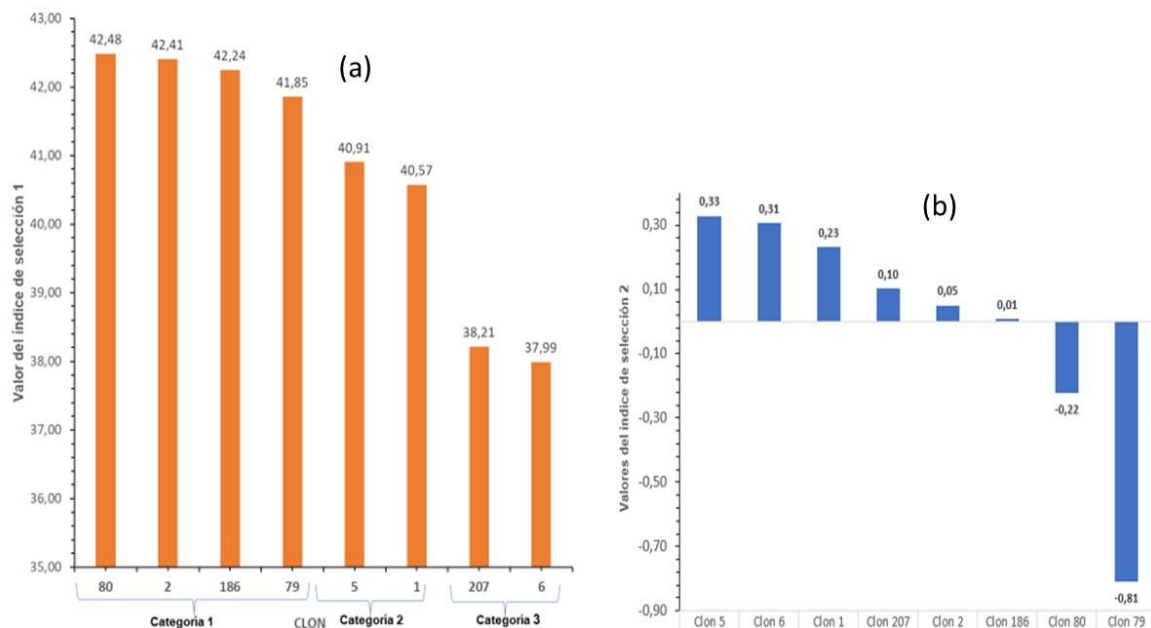


Figura 6. Valores del índice de selección 1 (a) y índice de selección 2 (b) de los clones de *S. macrophylla* de 9 años, Limón-Costa Rica.

El índice de selección 2 mostró valores en un rango de -1 a 1, en donde los mejores resultados fueron para los clones 5, 6 y 1 con un índice de 0,33, 0,31 y 0,23, respectivamente. Otro grupo de mediano desempeño en volumen y calidad estuvo conformado por

los clones 207, 2 y 186 y, por último, los clones que mostraron el índice más bajo fueron los clones 79 y 80 (**Figura 6b**).

2.7. Conclusiones

Los valores promedio del conjunto de clones para los parámetros módulo de elasticidad dinámica transversal, módulo de elasticidad dinámica longitudinal, peso específico básico, densidad verde, porcentaje de duramen y calidad del árbol en pie fueron 2367,9 MPa, 2946,3 MPa, 0,48, 0,80 g/cm³, 59,64 % y 70,24 % y respectivamente.

Los mejores clones en cuanto a los valores medios de las propiedades de la madera y su volumen total fueron los clones 80, 2, 186 y 79. Por otro lado, en cuanto a la calidad general del árbol y el volumen comercial, los mejores clones fueron 5, 6 y 1.

Las propiedades físicas y mecánicas presentes en las maderas de los clones, así como sus variables de crecimiento y de calidad, determinaron los diferenciales más apropiados de selección de los clones, lo cual es un insumo base importante para la determinación de los potenciales usos de los productos provenientes de plantaciones comerciales en posteriores investigaciones.

Al respecto del contraste de resultados de los dos índices de selección empleados, se destaca que el índice de selección 2 concuerda más con la valorización comercial del árbol en pie en el mercado actual de la madera. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos a través del índice de selección 1, este se ajusta más a la necesidad de contar con información técnica sobre las propiedades de la madera de cada clon, lo que ayudaría a definir los potenciales usos de la madera para el establecimiento de plantaciones comerciales con los clones estudiados.

2.8. Recomendaciones

Se recomienda realizar nuevos estudios técnicos para determinar los usos más apropiados de la madera de los mejores clones seleccionados, contribuyendo así a potenciar la reforestación comercial con clones de caoba.

A grandes rasgos, entre los usos más recomendados de acuerdo con las características y propiedades de los diferentes clones evaluados, se recomienda emplear la madera para la industria secundaria de muebles, artesanías y para productos de la construcción.

Se recomienda realizar otros estudios sobre las propiedades de la madera en árboles con edades superiores (20-30 años) para comparar los resultados con los obtenidos en este estudio.

También se recomienda hacer estudios, que involucren las mismas variables contempladas en este estudio y en el que se comparen clones de caoba de la misma edad, creciendo en sitios más secos y de menor precipitación, con los resultados de este estudio.

2.9. Agradecimientos

Al Doctor Roger Moya Roque, por ayudarme en todas y cada una de las fases del trabajo realizado, por ser un excelente tutor y una excelente persona dispuesta a ayudar y aconsejar en todo momento.

A los profesores Orlando Chinchilla Mora y Eugenio Corea Arias por toda la ayuda brindada en cuanto a la información del Proyecto de mejoramiento genético de la caoba y a la disposición para orientarme y apoyarme en este trabajo.

Al Doctor Alberth Morera Beita y a los colaboradores del Laboratorio de Ecología Tropical Aplicada de la Escuela de Ciencias Ambientales, por toda su cooperación en las mediciones y análisis de laboratorio. Especialmente Al Doctor Morera por sus consejos y ayuda brindada.

También quiero agradecer al Doctor Olman Murillo Gamboa de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica por la ayuda brindada, en cuanto a aspectos metodológicos especiales y su excelente disposición por ayudarme.

Quiero agradecer también a Adriana Chavarría Campos, Alex Arias Retana y Erick Arias Retana por su colaboración en los trabajos de campo y su acompañamiento en diferentes labores efectuadas para este estudio.

2.10. Referencias bibliográficas

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 (Informe principal)*, Roma, IT: FAO, 2010.
- [2] A. Barrantes Rodríguez, *Pago de servicios ambientales: su evolución de 1997 al 2004*, Heredia, CR, Oficina Nacional Forestal, 2004.
- [3] H. Arce Benavides y A. Barrantes Rodríguez, *La madera en Costa Rica Situación Actual y Perspectivas*, San José, CR, Oficina Nacional Forestal y Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, 2004.
- [4] A. Barrantes Rodríguez, "El desabastecimiento de madera en Costa Rica: causas, efectos y propuestas de solución", Organización para estudios tropicales (OET), Crusa, Catie, 2008.
- [5] H. Arce Benavides, "Plantaciones, sistemas agroforestales e industria", *Ambientico*, no. 186, pp. 13-16, 2009.
- [6] J. R. Serrano-Montero y R. Moya-Roque, "Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, no. 8, vol. 21, pp. 1–12, 2012.
- [7] S. Chavarría-Navarro, S. A. Molina-Murillo, S. Chavarría-Navarro, y S. A. Molina-Murillo, "¿Por qué no incrementa el consumo de madera local? El caso de Costa Rica", *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 15, no. 37, pp. 2-14, dic. 2018, DOI: 10.18845/rfmk.v15i37.3597
- [8] O. A. Aguirre-Calderón, "Manejo Forestal en el Siglo XXI", *Madera Bosques*, vol. 21, nov. 2015, DOI: 10.21829/myb.2015.210423
- [9] R. M. Roque, "Industrialización y comercialización de madera proveniente de plantaciones forestales en Costa Rica", *Recur. Nat. Ambiente*, no. 49, pp 154-162, 2007.
- [10] R. Guerrero Aguilar, "¿Cuáles especies forestales nativas debemos priorizar en Costa Rica para ser cultivadas comercialmente?" *Ambientico*, no. 267, pp. 37-40, 2018.

- [11] R. Moya Roque, “La producción de madera de especies nativas en plantaciones comerciales: una opción real”, *Ambientico*, no. 267, pp. 32-36, 2018.
- [12] O. Chinchilla; E. Corea y V. Meza, *Silvicultura de Clones superiores de Caoba (Swietenia macrophylla) en los primeros cuatro años de crecimiento, Costa Rica*, Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, 2018.
- [13] O. Chinchilla y E. Corea, “Alcances del proyecto de mejoramiento de la Caoba del Inisefor”, Comunicación personal, 2018.
- [14] K. Gerhardt y D. Fredriksson, «Biomass Allocation by Broad-Leaf Mahogany Seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in Abandoned Pasture and Secondary Dry Forest in Guanacaste, Costa Rica», *Biotropica*, vol. 27, p. 174, jun. 1995, doi: 10.2307/2388993.
- [15] O. Chinchilla, E. Corea, V. Meza, O. Chinchilla, E. Corea, y V. Meza, «Mejora genética y costos iniciales asociados al manejo de plantaciones clonales de *Swietenia macrophylla* en la región noreste de Costa Rica», *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 54, n.º 2, pp. 180-189, dic. 2020, doi: 10.15359/rca.54-2.10.
- [16] O.Chinchilla-Mora, E. Corea-Arias, V. Meza-Picado, y C. Ávila-Arias, «Crecimiento, rendimiento y costos durante los primeros tres años de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) establecida en sistemas agroforestales», *RFMK*, vol. 18, n.º 42, pp. 62–73, dic. 2020.
- [17] E. Corea-Arias, O. Chinchilla-Mora, V. Meza-Picado, y C. Ávila-Arias, «Costos cultivo de clones superiores de caoba (*Swietenia macrophylla* King) hasta 4 años de edad en Costa Rica», *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 17, n.º 41, pp. 94-105, dic. 2020, doi: 10.18845/rfmk.v17i41.5291.
- [18] R. Moya, C. Tenorio, C. Salas, A. Berrocal y F. Muñoz, *Tecnologías de la madera: plantaciones forestales*, Editorial Tecnológico de Costa Rica, 2019.
- [19] A. Nunes, G. Santos, M. D. de Resende, L. Silva, y T. Assis, «Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul», *Scientia Forestalis*, vol. 44, pp. 563-574, sep. 2016, doi: 10.18671/scifor.v44n111.03.
- [20] G. Makouanzi, G. Chaix, S. Nourissier, y P. Vigneron, «Genetic variability of growth and wood chemical properties in a clonal population of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* in the Congo», *Southern Forests: Journal of Forest Science* 80(2): 151–158, abr. 2018, doi: 10.2989/20702620.2017.1298015.
- [21] J. Gion et al., «Comprehensive genetic dissection of wood properties in a widely-grown tropical tree: *Eucalyptus*», *BMC genomics*, vol. 12, p. 301, jun. 2011, doi: 10.1186/1471-2164-12-301.

- [22] S. R. de Carvalho, J. S. de Holanda, y N. da S. Pio, «Análise das propriedades físicas da madeira de Mogno (*Swietenia macrophylla* King) em floresta plantada na Amazônia Central / Analysis of the physical properties of Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) wood in a planted forest in Central Amazonia», *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, vol. 4, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2021, doi: 10.34188/bjaerv4n2-096.
- [23] D. Gilbero, W. Abasolo, M. Matsuo, y H. Yamamoto, «LATERAL GROWTH AFFECTS XYLEM MATURATION PROPERTIES OF 8-YEAR-OLD BIG-LEAF MAHOGANY (*SWIETENIA MACROPHYLLA*)», *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 34, n.º 1, pp. 1-10, 2022.
- [24] W. J. León Hernández, «Variabilidad de la madera de *Swietenia macrophylla* King proveniente de plantaciones de 10 años de edad (Caparo, estado Barinas. Venezuela)», *Wood variability in *Swietenia macrophylla* King from 10 years Caparo plantations, Barinas, Venezuela*, feb. 2011, Accedido: 7 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/32523>
- [25] R. Roque y F. Muñoz-Acosta, «Physical and mechanical properties of eight fast-growing plantation species in Costa Rica», *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 22, pp. 317-328, jul. 2010.
- [26] E. Anoop, J. Cm, C. Sindhumathi, y C. Jayasree, «Wood physical, Anatomical and Mechanical properties of Big Leaf Mahogany (*Swietenia macrophylla* Roxb) a potential exotic for South India», *Research journal of agriculture and forestry sciences*, vol. 2, pp. 7-13, ago. 2014.
- [27] C. B. Briscoe, J. B. Harris, y D. M. Wyckoff, «Variation of Specific Gravity in Plantation-Grown Trees of Bigleaf Mahogany», 1963.
- [28] P. Perera, «Effect of Growth Rate on Wood Specific Gravity of Three Alternative Timber Species in Sri Lanka; *Swietenia macrophylla*, *Khaya senegalensis* and *Paulownia fortunei*», *Journal of Tropical Forestry and Environment*, vol. 2, pp. 26-35, ene. 2012.
- [29] P. Langbour, J. Gérard, D. Guibal, y R. T. du Cros, «Caractéristiques technologiques de *Swietenia macrophylla* King planté à la Martinique», *Bois Et Forêts Des Tropiques*, vol. 298, pp. 3-12, 2008.
- [30] P. Langbour, J. Gérard, J.-M. Roda, P. Fauzi, y D. Guibal, «Comparison of wood properties of planted big-leaf Mahogany (*Swietenia macrophylla*) in Martinique Island with naturally grown mahogany from Brazil, Mexico and Peru», *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 23, pp. 252-259, jul. 2011.

- [31] A. Sharmin, M. Shaduzzaman, M. Shamsuzzaman. «Variations of the physical and mechanical wood properties of *Swietenia macrophylla* in mixed and monoculture plantations», *International Research Journal of Engineering and Technology* 2015:2(5):692, 2015.
- [32] J. G. M. da Silva, G. B. Vidaurre, D. Minini, R. F. Oliveira, S. M. G. Rocha, y F. G. Gonçalves, «Qualidade da madeira de mogno brasileiro plantado para a produção de serrados», *Sci. For.*, vol. 47, n.º 121, mar. 2019, doi: 10.18671/scifor.v47n121.01.
- [33] M. Ashaduzzaman, NR. Mithun, A. Sharmin. «Physical and mechanical properties of plantation grown Mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) from Bangladesh». *Indian Journal of Forest* 34(1):61-6, 2011.
- [34] T. Mendoza, E. Alvarado, A. Elvir. «Comparación de propiedades físico-mecánicas de madera joven y madura de *Swietenia macrophylla* en plantaciones». *Revista Técnico Científica* 20 (1): 53-65, 2008.
- [35] A. A. Jara, E. D. Bello, S. V. A. Castillo, y P. S. Madamba, «Use of Relative Density-based Schedules in Kiln-Drying Big-Leafed Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) Lumber», vol. 137, n.º 2, p. 9, 2008.
- [36] A. Abarquez, D. Bush, J. Ata, E. J. Tolentino, y D. Gilbero, «Early growth and genetic variation of mahogany (*Swietenia macrophylla*) in progeny tests planted in northern Mindanao, Philippines», *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 27, pp. 314-324, jul. 2015.
- [37] D. J. Sudrajat, Y. Ayyasy, I. Z. Siregar, y L. Karlinasari, «Mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) as urban tree: tree growth and wood quality variation in a progeny test», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 918, n.º 1, p. 012042, nov. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/918/1/012042.
- [38] M. Chudnoff y T. F. Geary, «On the heritability of wood density in *Swietenia macrophylla*», *Turrialba* 23(3): 359-362, 1973.
- [39] M. Abarca, R. Moya, O. Chinchilla y C. Avila. «Genetic control of wood properties, drying and workability of nine-clone of *Swietenia macrophylla* King wood of 8-year-old in Costa Rica». *Journal Tropical Forest Science* (Submitted), 2022.
- [40] N. T. Mascia, «Modelo elástico ortotrópico aplicado a la madera», *Maderas-Cienc Tecnol*, vol. 5, n.º 1, Art. n.º 1, 2003.
- [41] J.-R. Sotomayor Castellanos, *Comportamiento elástico de la madera. Comportamiento elástico de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. 319 p. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.2972.7848.

- [42] J. C. F. Walker y R. Nakada, «Understanding corewood in some softwoods: a selective review on stiffness and acoustics», *The International Forestry Review*, vol. 1, n.º 4, pp. 251-259, 1999.
- [43] B. J. Zobel y J. P. van Buijtenen, *Wood Variation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1989. doi: 10.1007/978-3-642-74069-5.
- [44] M. Rudnicki, X. Wang, R. J. Ross, R. B. Allison, y K. Perzynski, «Measuring wood quality in standing trees--a review», *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-248*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 13 p., vol. 248, 2017, doi: 10.2737/FPL-GTR-248.
- [45] S. Vignote Peña, I. Martínez-Rojas, y A. Villasante Plagaro, «La silvicultura como primera operación de transformación de la madera», *RMCF*, vol. 2, n.º 4, pp. 7-14, jun. 2019, doi: 10.29298/rmcf.v2i4.597.
- [46] Zobel, B. & Talbert, Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales (pp.408-442). Raleigh: Limusa. 1992.
- [47] E. Wheeler, P. Baas, y P. Gasson, «IAWA List of Microscopie Features for Hardwood Identification», *IAWA journal / International Association of Wood Anatomists*, vol. 10, pp. 219-332, ene. 1989.
- [48] W. León, «Anatomía y densidad o peso específico de la madera», *Revista Forestal Venezolana*, vol. 54, no. 1, pp. 67-76, 2010.
- [49] A. Pashin y C. De Zeeuw, *Textbook of wood technology*, New York, EE. UU., McGraw-Hill Series in Forest Research, 1980.
- [50] R. Moya-Roque, C. Tenorio-Monge, C. Salas-Garita, y A. Berrocal-Jiménez, «Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica», *Estudio de propiedades de la madera de seis especies nativas en plantaciones de Costa Rica*, 2016, Accedido: 7 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9804>
- [51] C. Villee, *Biología*. Distrito Federal, México: McGraw Hill. 944 p, 1996.
- [52] F. Cervera, *Biblioteca Atrium de la madera*. 4ed, Barcelona, ES. Ediciones ATRIUM, 117p, 1989
- [53] E. Flores y G. Obando, *Árboles del trópico húmedo. Importancia socioeconómica*, 2.a edición, Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2014.
- [54] A. Kuprevicius, D. Auty, A. Achim, y J. Caspersen, «Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood», *Forestry*, vol. 86, may 2013, doi: 10.1093/forestry/cpt006.

- [55] B. J. Zobel y J. R. Sprague, *Juvenile Wood in Forest Trees*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. doi: 10.1007/978-3-642-72126-7.
- [56] C. H. Lee y S. Y. Wang, «A New Technique for the Demarcation Between Juvenile and Mature Wood in *Cryptomeria Japonica*», *IAWA Journal*, vol. 17, n.º 2, pp. 125-131, ene. 1996, doi: 10.1163/22941932-90001440.
- [57] S. Vignote, I. Martínez. *Tecnología de la madera*. MUNDI-PRENSA Libros S.A. 3 ed, 2005.
- [58] C. Jiménez-Rodríguez, «Calidad y valoración de plantaciones forestales: aplicación práctica en cinco plantaciones de *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. (cebo) en las zonas Norte y Atlántica de Costa Rica», *RFMK*, vol. 5, n.º 15, pp. pág. 55–59, oct. 2012.
- [59] O. Murillo y O. Rojas, «Calidad de las plantaciones de teca en la Península de Nicoya, Rosta Rica», *Agronomía Costarricense*, vol. 24, ene. 2000.
- [60] O. Murillo y Y. Badilla. *Calidad de la plantación forestal*. ITCR, Cartago, C.R.67 p, 2010.
- [61] O. Murillo, «Indices de calidad para la reforestacion en Costa Rica», *Agronomía Costarricense*, vol. 24, n.º 2, pp. 41-47, 2000.
- [62] Instituto Meteorológico Nacional (IMN), *Promedios mensuales de datos climáticos de la estación automática de los diamantes en Guápiles del período 1964-1998*.
- [63] O. Murillo y. Badilla, *Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica*, Cartago, Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, 2004.
- [64] S. Solórzano Naranjo, R. Roque, y S. Chauhan, «Early genetic evaluation of morphology and some wood properties of *Tectona grandis* L clones», *Silvae Genetica*, vol. 61, pp. 58-65, dic. 2012, doi: 10.1515/sg-2012-0008.
- [65] D. Zeledón, «Utilización del azul bromofenol para la determinación de la albura y el duramen en *Gmelina arborea* (Roxb)», *RFMK*, vol. 2, no. 5, pp. 102–103, nov. 2012.
- [66] B. A. Ruiz et al., «Valoración de métodos convencionales y no convencionales para el control del taladrador de las meliáceas en América», *Bosque (Valdivia)*, vol. 37, n.º 1, pp. 13-19, 2016, doi: 10.4067/S0717-92002016000100002.
- [67] M. F. Obando y R. Roque, «Silviculture conditions and wood properties of *Samanea saman* and *Enterolobium cyclocarpum* in 19-year-old mixed plantations», *Forest Systems*, vol. 22, abr. 2013, doi: 10.5424/fs/2013221-02563.

- [68] K. M. Bhat, «Timber quality of teak from managed tropical plantations with special reference to Indian plantations.», *Bois et Forêts des Tropiques*, n.º No. 263, pp. 6-16, 2000.
- [69] R. Moya-Roque, F. Muñoz-Acosta, C. Salas-Garita, A. Berrocal-Jiménez, L. Leandro-Zúñiga, y E. Esquivel-Segura, «Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas», *RFMK*, vol. 7, n.º 18-19, pp. pág. 1–208, sep. 2012.
- [70] V. Bucur, *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [71] V. Bucur, *Acoustics of wood*, 2.a ed, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, GE, 2006.
- [72] X. Wang, F. Divos, C. Pilon, B. K. Brashaw, R. J. Ross, y R. E. Pellerin, *Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: a guide for use and interpretation*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147, Madison, EE. UU., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004.
- [73] X. Wang, R. J. Ross, B. K. Brashaw, J. Punches, J. R. Erickson, J. W. Forsman y R. E. Pellerin, "Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs", *Wood and Fiber Science*, vol. 36, no. 3, pp. 368-377, 2004.
- [74] X. Wang et al., «Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique.», (Research paper FPL ; RP-585):9 p. : ill. ; 28 cm., vol. 585, -1, Accedido: 7 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/5975>