

Genetic characteristics of wood properties of 14 clones of *Gmelina arborea* Roxb. in the South Pacific of Costa Rica

Características genéticas de las propiedades de la madera de 14 clones de *Gmelina arborea* Roxb. en el Pacífico Sur de Costa Rica

Moisés A. Cruz-Vargas¹; Johanna Gaitán-Álvarez²; Carlos Ávila-Arias²; Roger Moya^{1*}; Rafael Murillo-Cruz²

¹Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Apartado postal 40101, Heredia, Costa Rica.

²Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Apartado postal 30105, Cartago, Costa Rica.

*Corresponding author: rmoya@itcr.ac.cr; tel.: +506 2550 9092.

Abstract

Introduction: *Gmelina arborea* Roxb. is planted in reforestation programs with clones to improve productivity.

Objective: We aimed to evaluate wood properties and determine the heritability of 14 clones of *G. melina* to establish a genetic ranking for selection.

Materials and methods: The trial was established with a randomized complete block design (six blocks of six individuals of each clone of 36 months of age). Basal area and volume, tree morphological properties (diameter, bark, sapwood and heartwood) and wood physical properties (specific gravity, green density and moisture content) were estimated for each individual.

Results and discussion: Growth parameters were not significantly different ($P > 0.05$) among the 14 clones. Clone had no significant effect on specific weight and moisture content in the genetic analysis, while tree stem height had a significant impact on all variables. The clone*height interaction was not significant for the variables studied. As for genetic control, high individual heritability values were determined only for heartwood percentage. The ranking analysis evidenced that the best clones were 1, 7, 12 and 13, positioning themselves in category 1.

Conclusions: Four clones were higher regarding growth and some wood properties, showing potential for further genetic improvement of *G. arborea* in reforestation programs.

Keywords: stem height; heartwood; heritability; *gmelina*; genetic ranking.

Resumen

Introducción: *Gmelina arborea* Roxb. es plantada en los programas de reforestación con clones para mejorar la productividad.

Objetivo: Evaluar las propiedades de la madera y determinar la heredabilidad de 14 clones de *G. melina* para establecer un *ranking* genético de selección.

Materiales y métodos: El ensayo se estableció con un diseño de bloques completos al azar (seis bloques de seis individuos de cada clon de 36 meses de edad). El volumen y área basal, las propiedades morfológicas del árbol (diámetro, corteza, albura y duramen) y físicas de la madera (peso específico, densidad verde y humedad) se determinaron en cada individuo.

Resultados y discusión: Los parámetros de crecimiento no variaron significativamente ($P > 0.05$) entre los 14 clones. En el análisis genético, el clon no tuvo efecto significativo sobre el peso específico ni el contenido de humedad, mientras que la altura del fuste del árbol sí influyó significativamente sobre todas las variables. La interacción clon*altura no fue significativa en las variables estudiadas. En cuanto al control genético, se determinaron valores altos de heredabilidad individual solo para el porcentaje de duramen. El análisis de *ranking* evidenció que los mejores clones fueron el 1, 7, 12 y 13, posicionándose en la categoría 1.

Conclusión: Cuatro clones fueron superiores considerando el crecimiento y algunas propiedades de la madera, los cuales presentan potencial para seguir mejorando genéticamente a *G. arborea* en los programas de reforestación.

Palabras clave: altura del fuste; duramen; heredabilidad; *melina*; *ranking* genético.

Introduction

Gmelina arborea Roxb. (melina) is an important source of timber production in the Costa Rican market and in other tropical regions of the Americas, Asia, Africa and Oceania (Iwuoha et al., 2021). The species has adaptability to sites of different fertility and versatility of wood uses (Ataguba et al., 2015) such as furniture, pulp production, particleboard or plywood manufacturing (Moya et al., 2019); in addition, it has carbon sequestration potential, an important factor in climate change mitigation (Kaith et al., 2023). In Costa Rica, approximately 65 000 ha have been planted with *G. arborea* under different ecological, growth and silvicultural management conditions (Pinnschmidt et al., 2023), mainly for the production of logs for sawmilling purposes.

Melina wood has medium density, straight and clear grain, good appearance and durability, good conditions for processing and workability, characteristics that make it very desirable in the markets (Moya et al., 2019). As a result of these reasons and the evolution that the reforestation sector has undergone in recent decades, new techniques have been introduced to produce trees in very short periods using clonal silviculture and genetic selection (Borpuzari & Kachari, 2019), thus increasing the productivity of plantations in Costa Rica (Hernández-Castro et al., 2021a, 2021b). Therefore, tree breeding focuses on increasing plantation production with trees that have adequate diameter development and tree shape factors (Ortega-Ramírez et al., 2022). Melina can be improved rapidly, because it is a species that responds very well to strict selection of high or plus trees (Hernández-Castro et al., 2021a).

In Costa Rica, genetic improvement began in the 1990s, leading to the development of highly productive genetics for timber production on a regional scale (Hernández-Castro et al., 2021a). The most successful melina breeding programs in the region use clonal propagation to establish commercial plantation and thus obtain a reliable bank of propagules that are easy to produce and plant, resulting in fast-growing trees with high productivity (Rocha et al., 2020). Some examples include the genetic improvement study of Avila-Arias et al. (2015) in the South Pacific of Costa Rica, who recorded a selection differential of 19.8 cm, 54 m³·tree⁻¹ and 54.4 % in diameter, volume and stem quality, respectively, of melina plus trees compared to the base population. In this same region, Avila-Arias et al. (2014) demonstrated that melina genetic material significantly reduced cutting shifts (five to six years) with the consequent production of wood for several uses.

Cloning studies in melina have mainly focused on the analysis of species morphological properties (Li et al. 2017) and not so much on wood properties (Rodríguez-

Introducción

Gmelina arborea Roxb. es una fuente importante de producción de madera en el mercado de Costa Rica y en otras regiones tropicales de América, Asia, África y Oceanía (Iwuoha et al., 2021). La especie tiene adaptabilidad a sitios de diferente fertilidad y versatilidad de usos de la madera (Ataguba et al., 2015) como muebles, producción de pulpa, fabricación de tableros de partículas o terciados (Moya et al., 2019); además, tiene potencial de secuestro de carbono, factor importante en la mitigación del cambio climático (Kaith et al., 2023). En Costa Rica se han plantado aproximadamente 65 000 ha con *G. arborea* en diferentes condiciones ecológicas, de crecimiento y de manejo silvicultural (Pinnschmidt et al., 2023), principalmente para la producción de trozas con fines de aserrío (Moya et al., 2019).

La madera de melina posee densidad media, grano recto y claro, buena apariencia y durabilidad, así como buenas condiciones para el procesamiento y trabajabilidad, características que la hacen muy apetecida en los mercados (Moya et al., 2019). Por estas razones y la evolución que el sector de reforestación ha experimentado en las últimas décadas, es que se ha incursionado en nuevas técnicas para la producción de árboles en periodos muy cortos a través de la silvicultura clonal y la selección genética (Borpuzari & Kachari, 2019), logrando así aumentar la productividad de las plantaciones en Costa Rica (Hernández-Castro et al., 2021a, 2021b). En este sentido, el mejoramiento genético se centra en el incremento de la producción de las plantaciones con árboles de un desarrollo adecuado en diámetro y de factores de forma del árbol (Ortega-Ramírez et al., 2022). La melina permite su mejoramiento rápidamente, ya que es una especie que responde muy bien a la selección estricta de árboles superiores o plus (Hernández-Castro et al., 2021a).

En Costa Rica, el mejoramiento genético inició en los años 90, lo que llevó al desarrollo genético altamente productivo para la producción de madera a escala regional (Hernández-Castro et al., 2021a). Los programas de mejoramiento de melina más exitosos de la región utilizan la propagación clonal para establecer su plantación comercial y así obtener un banco confiable de propágulos que son fáciles de producir y plantar, dando como resultado árboles de crecimiento rápido y productividad alta (Rocha et al., 2020). Entre algunos ejemplos se puede mencionar el estudio de mejoramiento genético de Avila-Arias et al. (2015) en el Pacífico Sur de Costa Rica, quienes registraron un diferencial de selección de 19.8 cm, 54 m³·árbol⁻¹ y 54.4 % en el diámetro, volumen y calidad del fuste, respectivamente, de árboles plus de melina con respecto a la población base. En esta misma región,

Pérez et al., 2022). For example, Hernández-Castro et al. (2021b) evaluated the coefficients of genetic variation, heritability and genetic correlations in phenotypic properties such as diameter, commercial height, commercial volume and stem quality of 10-, 22- and 34-month-old melena clones. On the other hand, Avila-Arias et al. (2014) evaluated the performance of 27-month-old clones regarding diameter and commercial height. Nunes et al. (2016) and Makouanzi et al. (2018) mention that wood physical, mechanical and chemical properties show high genetic controls that should be used in the selection of the best genotypes, together with lower controls such as growth traits. Makouanzi et al. (2018) explained that wood physical properties are often given by a single biosynthetic pathway, influenced little by the environment. Thus, wood properties show greater genetic control than growth traits, because these are more influenced by the environment (Nunes et al., 2016).

Therefore, the objective of this study is to evaluate tree growth parameters, wood physical properties and heritability to establish a genetic ranking for the selection of 14 three-year-old clones of *G. arborea* in southern Costa Rica. Knowing these variables will allow us to maximize the potential of the genetic improvement program of this species in commercial reforestation in Costa Rica.

Materials and Methods

Sampling area

The study was carried out in a clonal trial of *G. arborea* at the Forestry Research Institute of the University of Costa Rica (INISEFOR-UNA), located in the town of Monterrey, Puerto Jimenez district, cantón de Golfito, Puntarenas province, southern Costa Rica, between the geographical coordinates 8.57701° N and 83.39655° W. Mean annual precipitation ranging from 3 500 to 4 000 mm, mean annual temperature of 24 °C to 28 °C and altitude of 20 m. The region is classified as very humid forest-premontane transition to basal forest (Dehaspe et al., 2022).

Setting and Experimental Design

The trial was established with a randomized complete block design. Genetic material of 14 genotypes was used, which had not been evaluated so far, so they are F1 clones. Six blocks composed of six individuals of each clone in pairs were planted, that is, three pairs of each clone, giving an average of 84 trees per block (Figure 1). The initial stock density of the plantation was 816 trees·ha⁻¹ with a three-year thinning of 50 %, so the stock density at the time of sampling was 408 trees·ha⁻¹.

Ávila-Arias et al. (2014) demostraron que el material genético de melena redujo significativamente los turnos de corta (cinco a seis años) con la producción consecuente de madera para usos diversos.

Los estudios sobre clonación en melena se han enfocado principalmente en el análisis de las propiedades morfológicas de las especies (Li et al. 2017) y no tanto en las propiedades de la madera (Rodríguez-Pérez et al., 2022). Por ejemplo, Hernández-Castro et al. (2021b) evaluaron los coeficientes de variación genética, la heredabilidad y las correlaciones genéticas en las propiedades fenotípicas como diámetro, altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste de clones de melena de 10, 22 y 34 meses de edad. Por su parte, Ávila-Arias et al. (2014) evaluaron el desempeño de clones de 27 meses de edad considerando el diámetro y altura comercial. Por otro lado, Nunes et al. (2016) y Makouanzi et al. (2018) mencionan que las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la madera presentan controles genéticos altos que deben usarse en la selección de los mejores genotipos, en conjunto con controles más bajos como los rasgos de crecimiento. Makouanzi et al. (2018) explicaron que las propiedades físicas de la madera están dadas a menudo por una única vía de biosíntesis, influenciadas poco por el medio ambiente. Así, las propiedades de la madera muestran un mayor control genético que los rasgos de crecimiento, debido a que estos son más influenciados por el ambiente (Nunes et al., 2016).

Dado este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los parámetros de crecimiento del árbol, las propiedades físicas de la madera y la heredabilidad para establecer un *ranking* genético de selección de 14 clones de *G. arborea* a una edad de tres años en la zona sur de Costa Rica. El conocimiento de estas variables permitirá potencializar al máximo el programa de mejoramiento genético de esta especie en la reforestación comercial de Costa Rica.

Materiales y métodos

Área de muestreo

El estudio se realizó en un ensayo clonal de *G. arborea* del Instituto de Investigación de Estudios Forestales de la Universidad de Costa Rica (INISEFOR-UNA), ubicado en la localidad de Monterrey, distrito Puerto Jiménez, cantón de Golfito, provincia de Puntarenas, zona sur de Costa Rica, entre las coordenadas geográficas N 8.57701° y O 83.39655°. La precipitación media anual oscila entre 3 500 a 4 000 mm, temperatura media anual de 24 °C a 28 °C y altitud de 20 m. La región está clasificada como Bosque muy húmedo-Premontano transición a basal (Dehaspe et al., 2022).

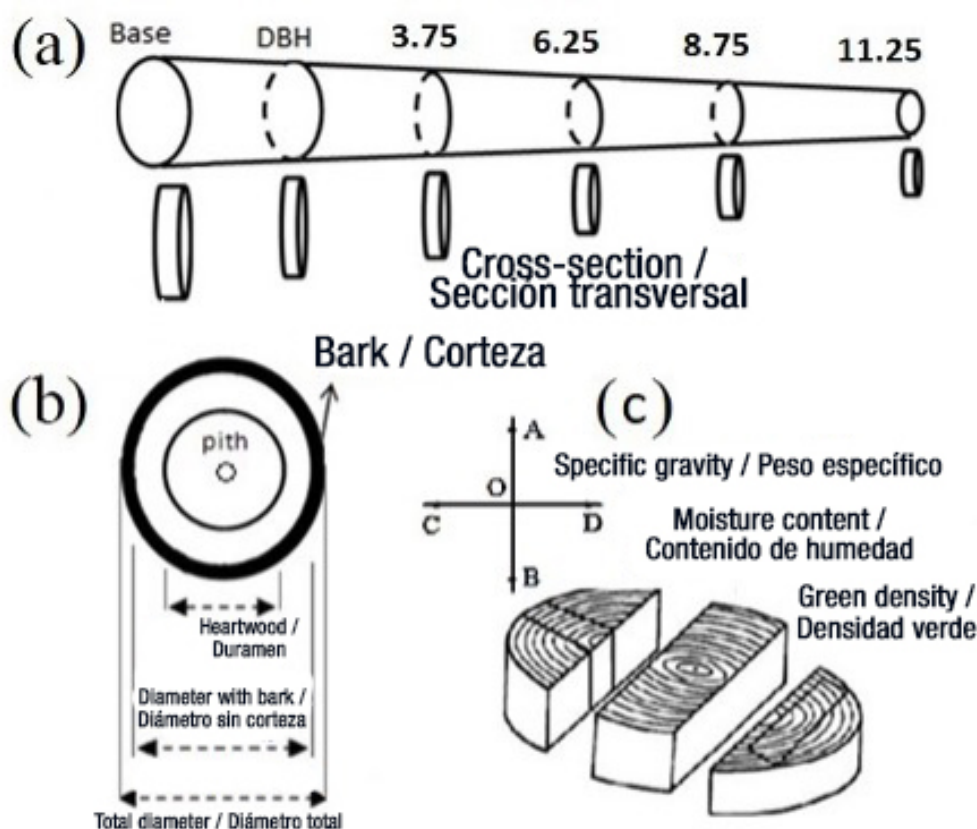


Figure 2. Extraction of the sampled cross section of the stem (a), morphological parameters measured in the cross section (b) and sawing pattern of the cross section for determining the physical properties (c) of *Gmelina arborea*.

Figura 2. Extracción de la sección transversal muestreada del tronco (a), parámetros morfológicos medidos en la sección transversal (b) y patrón de aserrado de la sección transversal para la determinación de las propiedades físicas (c) de *Gmelina arborea*.

Once the values of volume and basal area of the individuals were determined, in both cases an average per clone was recorded and this value was extrapolated to the stock density of the plantation (408 trees·ha⁻¹), thus providing a value of volume and basal area per hectare for each clone. These two parameters per unit area were used, as they indicate the use capacity of the site (Vásquez-Bautista et al., 2016).

Wood properties

The selected trees were cut in 3 cm thick transverse sections along the stem: the first disk was cut at DBH, then a 3 cm thick disk was extracted every 2.5 m until completing the total trunk height 3.75 m, 6.25 m, 8.75 m, 8.75 m, 11.75 m and 13.75 m (Figure 2a).

Morphological properties

Tree diameter, bark (thickness and percentage of total area), sapwood (thickness and percentage of total area) and heartwood (diameter and percentage of total area) were determined in each cross section for each height.

Se aseguró que los árboles seleccionados fueran de tronco recto y libre de síntomas de enfermedades o plagas. En estos árboles se determinó diámetro a la altura del pecho a 1.3 m (DAP, cm), altura total (Ht, m) y comercial (Hc, m). Con estos datos y la densidad de la plantación (N) se obtuvo el área basal (m²) y el volumen (m³) de cada uno de los individuos, utilizando la fórmula de volumen de árboles en pie, donde el factor de forma fue 0.65 cm·m⁻¹ y 10 000 corresponde al factor de conversión de cm² a m²:

$$\text{Volumen} = \frac{\pi}{4} * \frac{(\text{DAP})^2}{10000} * \text{Ht} * 0.65$$

$$\text{Área basal} = \frac{\pi}{4} * \text{DAP}^2 * 10000 * N$$

Una vez obtenidos los valores de volumen y área basal de los individuos, en ambos casos se obtuvo un promedio por clon y este valor se extrapoló a la densidad de la plantación (408 árboles·ha⁻¹) con esto se obtuvo valor de volumen y área basal por hectárea de cada clon. Estos dos parámetros por unidad de superficie se utilizaron, ya que indican la capacidad de uso que tiene el sitio (Vásquez-Bautista et al., 2016).

Two perpendicular lines were drawn crossing the center of each cross section, one in the A-B direction and the other in the C-D direction (Figure 2c). Total diameter, bark-free diameter and heartwood diameter were measured in both directions drawn on the cross section (Figure 2b). The averages of the two cross-sectional measurements were calculated to obtain both total diameter and heartwood diameter. Bark and sapwood thicknesses were calculated as the difference between the total diameter, bark-free diameter (in the case of bark) and heartwood diameter (in the case of sapwood). Diameters were calculated assuming a geometric circle. The percentages of bark, sapwood and heartwood were calculated depending on the area of each tissue and the total cross-section.

Physical properties

Green density, specific gravity and moisture content in green condition were determined in each cross section of the stem and for each height (DBH, 3.75, 6.25 m, 8.75 m, 11.25 m and 12.75 m). Sections 3.0 cm wide were cut from each cross section, including the pith (Figure 2c). These sections were separated by the pith, with two samples obtained from each (Figure 2c). Green density was calculated by green weight/green volume ratio, specific gravity and MC-G according to ASTM D-143 and ASTM D-2395 procedures (ASTM International, 2022a, 2022b).

Statistical Analysis

A general statistical description (average and coefficient of variation) was applied for all wood properties. Prior to the analysis of variance (ANOVA), the normality of the data distribution was verified with the Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variances with a homoscedasticity test. Data was analyzed using a two-factor randomized block design corresponding to clone as factor 1 and height as factor 2:

$$Y_{ij} = \mu_{ij} + C_i + H_j + C_i * H_j * \epsilon_{ij}$$

where, Y is the wood property value, μ s the population mean, C is the clone effect, H is the height effect and $C_i * H_j$ is the effect of the clone*height interaction and ϵ is the model error.

Subsequently, a comparison of means was made using Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). Data analysis was carried out with the statistical program SAS Studio for academics (Cary, NC, EUA).

Genetic analysis

Data was analyzed with the SELEGEN REML/BLUP software version 2008 (Brasilia, Brazil, Embrapa), extensively explained by Resende (2002, 2016). The statistical model

Propiedades de la madera

Los árboles seleccionados se cortaron en secciones transversales de 3 cm de espesor a lo largo del tronco: el primer disco fue cortado al DAP, luego se extrajo un disco de 3 cm de espesor cada 2.5 m hasta completar la altura total del tronco 3.75 m, 6.25 m, 8.75 m, 11.25 m y 13.75 m (Figura 2a).

Propiedades morfológicas

En cada sección transversal de cada altura se determinó el diámetro del árbol, la corteza (grosor y porcentaje de área total), la albura (grosor y porcentaje de área total) y el duramen (diámetro y porcentaje de área total). Se dibujaron dos líneas perpendiculares que cruzan el centro de cada sección transversal, una en la dirección A-B y la otra en la dirección C-D (Figura 2c). El diámetro total, el diámetro sin corteza y el diámetro del duramen se midieron en ambas direcciones dibujadas en la sección transversal (Figura 2b). Los promedios de las dos medidas transversales se calcularon para obtener tanto el diámetro total como el diámetro del duramen. Los espesores de corteza y albura se obtuvieron como la diferencia entre el diámetro total, diámetro sin corteza (en el caso de la corteza) y diámetro del duramen (en el caso de la albura). Los diámetros se calcularon asumiendo un círculo geométrico. Los porcentajes de corteza, albura y duramen se calcularon con relación al área de cada tejido y al total de la sección transversal.

Propiedades físicas

La densidad verde, peso específico y contenido de humedad en condición verde se determinaron en cada sección transversal del tronco y para cada altura (DAP, 3.75, 6.25 m, 8.75 m, 11.25 m y 12.75 m). En cada sección transversal se cortaron secciones de 3.0 cm de ancho, incluida la médula (Figura 2c). Estas secciones se separaron por la médula, obteniendo dos muestras de cada una (Figura 2c). La densidad verde se calculó mediante la relación peso verde/volumen verde, peso específico y MC-G según los procedimientos ASTM D-143 y ASTM D-2395 (ASTM International, 2022a, 2022b).

Análisis estadístico

Se aplicó una descripción estadística general (promedio y coeficiente de variación) para todas las propiedades de la madera. Antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA) se verificó la normalidad de la distribución de los datos con la prueba Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante una prueba de homoscedasticidad. Los datos se analizaron en un diseño de bloques al azar de dos factores que corresponden al clon como factor 1 y altura como factor 2

$$Y_{ij} = \mu_{ij} + C_i + H_j + C_i * H_j * \epsilon_{ij}$$

combined fixed and random effects, where the number of replications is a fixed effect because it is decided by a value and the random effects were the genetic effects and the residuals, according to that proposed by Resende (2016) for this type of trials.

$$X_r = Z_r + W_p + \varepsilon$$

where,

Z is the data vector, r is the repetition effect vector ("fixed") and summed to the overall average, W is the vector of individual additive genetic effects ("random"), p is the vector of plot effects ("random") and ε is the vector of residuals ("random").

Genetic parameters

The genetic parameters estimated were average heritability of clones (H^2 clone), coefficient of genotypic variation among clones (CV_{gt}%) and clone genotypic prediction error variance (PEV), assuming complete survival, according to the following equations:

$$H^2 \text{ clone} = \frac{0.25 * V_{ad}}{0.25 * V_p + \frac{V_{plot}}{6} + \frac{0.25 * V_{ad} + V_e}{18}}$$

$$CV_{gt}\% = \sqrt{\frac{\text{accuracy}}{\text{overall average}}} * 100$$

where,

V_p = complete survival, 6 is the number of repetitions ($r = 6$)

V_{ad} = additive variance

V_{plot} = within-block clone variance

V_e : variance of error, 6 is the number of trees in each plot after thinning ($n = 3$), 18 is the total number of effective trees in test.

Precision = $\sqrt{\text{precision of family selection assuming complete survival}}$.

Selecting the best clone

The best clone was chosen based on a selection index with the results of each of the variables tested: total volume, heartwood percentage, green density (GD), specific gravity (SG) and moisture content under green condition (MC-G), using the following equation:

$$\text{Selection index} = \text{Total volume} * 0.30 + \text{SG} * 0.30 + \text{Heartwood percentage} * 0.25 + \text{MC} - \text{G} * 0.25$$

donde, Y es el valor de propiedad de madera, μ es la media de la población, C es el efecto del clon, H el efecto de la altura y $C_i * H_j$ es el efecto de la interacción clon*altura y ε es el error del modelo.

Posteriormente se hizo una comparación de medias mediante la prueba de rangos múltiples de Tukey ($P < 0.05$). El análisis de los datos se hizo con el programa estadístico SAS Studio para académicos (Cary, NC, EUA).

Análisis genético

Los datos se analizaron con el software SELEGEN REML/BLUP versión 2008 (Brasilia, Brasil, Embrapa), ampliamente explicado por Resende (2002, 2016). El modelo estadístico combinó efectos fijos y aleatorios, donde el número de repetición es efecto fijo por que este se decide por un valor y los efectos aleatorios fueron los efectos genéticos y los residuos, acorde con lo propuesto por Resende (2016) para este tipo de ensayos:

$$X_r = Z_r + W_p + \varepsilon$$

donde,

Z es el vector de datos, r es el vector de efecto de la repetición (fijos) y sumado a la media general, W es el vector de efectos genéticos aditivos individuales (aleatorios), p es el vector de efectos de trama (aleatorios) y ε es el vector de residuos (aleatorios).

Parámetros genéticos

Los parámetros genéticos estimados fueron heredabilidad media de los clones (H^2 clon), coeficiente de variación genotípica entre clones (CV_{gt}%) y varianza del error de la predicción de los valores genotípicos de los clones (PEV), suponiendo supervivencia completa, de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

$$H^2 \text{ clon} = \frac{0.25 * V_{ad}}{0.25 * V_p + \frac{V_{plot}}{6} + \frac{0.25 * V_{ad} + V_e}{18}}$$

$$CV_{gt}\% = \sqrt{\frac{\text{precisión}}{\text{Media general}}} * 100$$

donde,

V_p = supervivencia completa, 6 es el número de repeticiones ($r = 6$)

V_{ad} = varianza aditiva

V_{plot} = varianza del clon dentro del bloque

Each variable was given a relative weight: total volume with 30 %, green density with 25 %, heartwood percentage with 15 % and MC-G with 15 %. After calculating the selection index for each clone, four categories were established. These were obtained by dividing the highest and lowest values recorded by 4. Table 1 shows the range and name of the category.

Results

Growth properties

Table 2 shows the growth parameters of the clones studied. None of the measured variables (DBH, total height,

Ve: varianza del error, 6 es el número de árboles dentro de cada parcela después del raleo (n = 3), 18 es el número total de árboles efectivos en prueba.

Precisión = $\sqrt{\text{precisión de la selección de familias suponiendo supervivencia completa.}}$

Selección del mejor clon

El mejor clon se eligió a partir de un índice de selección con los resultados de cada una de las variables ensayadas: volumen total, porcentaje de duramen, densidad verde (GD), peso específico (SG) y contenido de humedad en condición verde (MC-G), utilizando la ecuación siguiente:

Table 1. Values and names of the categories established for the classification of 14 *Gmelina arborea* clones in Costa Rica.
Cuadro 1. Valores y nombres de las categorías establecidas para la clasificación de 14 clones *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Category/ Categoría	Range/ Rango	Name of the category/Nombre de categoría
1	42.1 – 44.5	High production clones and acceptable wood properties/ Clones de producción alta y propiedades aceptables de la madera
2	39.5 – 42.0	Medium-high production clones with medium-high wood quality/ Clones de producción media-alta y calidad media-alta de la madera
3	38.0 – 39.4	Medium to low production clones and medium to low wood quality/ Clones de producción media a baja y calidad media a baja de la madera/
4	34.0 – 38.0	Low production clones with unacceptable wood properties/ Clones de producción baja y propiedades no aceptables de la madera

Table 2. Growth characteristics of 14 clones of *Gmelina arborea* from southern Costa Rica.

Cuadro 2. Características de crecimiento de 14 clones de *Gmelina arborea* de la zona sur de Costa Rica.

Clone/ Clon	DBH (cm)/ DAP (cm)	Total height (m)/ Altural total (m)	Commercial height (m)/ Altura comercial (m)	Basal area (m ² ·ha ⁻¹)/ Área basal (m ² ·ha ⁻¹)	Total volume (m ³ ·ha ⁻¹)/ Volmen total (m ³ ·ha ⁻¹)
1	23.15 (23.52) a	23.15 (59.22) a	13.35 (39.73) a	17.73 a	81.72
2	21.20 (8.00) a	23.80 (59.22) a	15.08 (15.71) a	14.51 a	78.47
3	23.50 (4.81) a	24.10 (59.22) a	16.45 (6.45) a	17.79 a	101.40
4	24.60 (2.30) a	24.95 (59.22) a	17.30 (1.63) a	19.49 a	102.32
5	24.05 (2.65) a	25.10 (59.22) a	14.70 (25.98) a	18.63 a	99.12
6	24.15 (7.91) a	24.80 (59.22) a	17.35 (0.41) a	18.83 a	98.99
7	25.25 (1.40) a	25.00 (59.22) a	17.60 (3.21) a	20.53 a	104.67
8	25.75 (8.51) a	24.80 (59.22) a	17.20 (7.40) a	21.42 a	109.93
9	22.65 (7.18) a	24.55 (59.22) a	16.43 (10.98) a	16.56 a	91.81
10	23.90 (2.37) a	24.90 (59.22) a	17.00 (0.98) a	18.39 a	92.69
11	24.95 (2.55) a	24.70 (59.22) a	17.40 (0.81) a	20.04 a	99.82

Table 2. Growth characteristics of 14 clones of *Gmelina arborea* from southern Costa Rica. (Cont.)Cuadro 2. Características de crecimiento de 14 clones de *Gmelina arborea* de la zona sur de Costa Rica. (Cont.)

Clone / Clon	DBH (cm) / DAP (cm)	Total height (m) / Altural total (m)	Commercial height (m) / Altura comercial (m)	Basal area (m ² ·ha ⁻¹) / Área basal (m ² ·ha ⁻¹)	Total volume (m ³ ·ha ⁻¹) / Volmen total (m ³ ·ha ⁻¹)
12	24.90 (6.25) a	25.55 (59.22) a	18.03 (0.59) a	20.00 a	105.37
13	24.05 (0.29) a	24.55 (59.22) a	17.25 (2.05) a	18.62 a	96.30
16	23.40 (15.71) a	24.80 (59.22) a	16.70 (10.16) a	17.84 a	95.40

Same letters indicate that variables had no significant differences between clones according to Tukey's test ($P > 0.05$). Values in parentheses correspond to the coefficient of variation (%). DBH: diameter at breast height at 1.3 m. /

Letras iguales indican que las variables no tuvieron diferencias significativas entre clones acorde con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). Los valores entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación (%). DAP: diámetro a la altura del pecho a 1.3 m.

commercial height and basal area) showed statistical differences ($P > 0.05$) among the 14 clones studied.

Wood properties and variations

Figure 3 shows the variables measured in the 14 clones of *G. arborea* depending on stem height. The average diameter of the clones ranged from 23.93 cm to 14.24 cm (Figure 3a), the average heartwood diameter ranged from 16.18 cm to 8.38 cm (Figure 3b) and the heartwood percentage ranged from 51.45 % to 33.94 % (Figure 3e). Heartwood percentage showed wide variation among clones (Figure 3e), while for tree and heartwood diameter, clones 5 and 6 had the lowest values (Figure 3a-b). These three parameters, as expected, decreased with height. As for average bark and sapwood thickness, the first parameter varied between 0.45 cm and 2.89 cm and increased with stem height with little variation among trees (Figure 3d), while sapwood thickness varied between 7.30 cm and 4.99 cm and decreased with height with great variation among clones (Figure 3c), with clone 10 being the thickest. Bark percentage tended to decrease from the base up to a height of 7.5 m; thereafter, it increased up to the highest part sampled, again with significant variation among trees (Figure 3f). The average percentage of sapwood remained in a range of 36.08 % to 52.56 % and tends to increase depending on the height and with no clear trend among clones (Figure 3g).

Regarding physical properties, Figure 3 also shows that the average moisture content in green condition varies between 182.68 % and 112.52 % and decreases with increasing tree height (Figure 3h). In this parameter, a trend is shown among the clones depending on the heights; clone 10 along the entire length of the stem has the lowest moisture content and clone 9 has the highest content. Regarding specific weight, it increases with tree

$$\text{Índice de selección} = \text{Volumen total} * 0.30 + \text{SG} * 0.30 + \text{Porcentaje de duramen} * 0.25 + \text{MC} - \text{G} * 0.25$$

A cada variable se le asignó un peso relativo: volumen total con 30 %, densidad verde con 25 %, porcentaje de duramen con 15 % y MC-G con 15 %. Después del cálculo del índice de selección para cada clon se establecieron cuatro categorías. Estas se obtuvieron dividiendo el valor más alto y el más bajo registrado entre 4. El Cuadro 1 muestra el rango y el nombre de la categoría.

Resultados

Propiedades de crecimiento

Los parámetros de crecimiento de los clones estudiados son presentados en el Cuadro 2. Es importante hacer referencia que ninguna de las variables medidas (DAP, altura total, altura comercial y área basal) mostraron diferencias estadísticas ($P > 0.05$) entre los 14 clones estudiados.

Propiedades de la madera y su variación

La Figura 3 muestra las variables medidas en los 14 clones de *G. arborea* en relación con la altura del fuste. El diámetro promedio de los clones varió entre 23.93 cm y 14.24 cm (Figura 3a), el diámetro promedio de duramen varió entre 16.18 cm y 8.38 cm (Figura 3b) y el porcentaje de duramen varió entre 51.45 % y 33.94 % (Figura 3e). El porcentaje de duramen presentó amplia variación entre clones (Figura 3e), mientras que para el diámetro del árbol y del duramen, los clones 5 y 6 fueron los de menor valor (Figura 3a-b). Estos tres parámetros, como es de esperar, disminuyen con la altura. En cuanto al espesor promedio de corteza y albura, el primer parámetro varía entre 0.45 cm y 2.89 cm y aumenta con la altura del fuste con poca variación

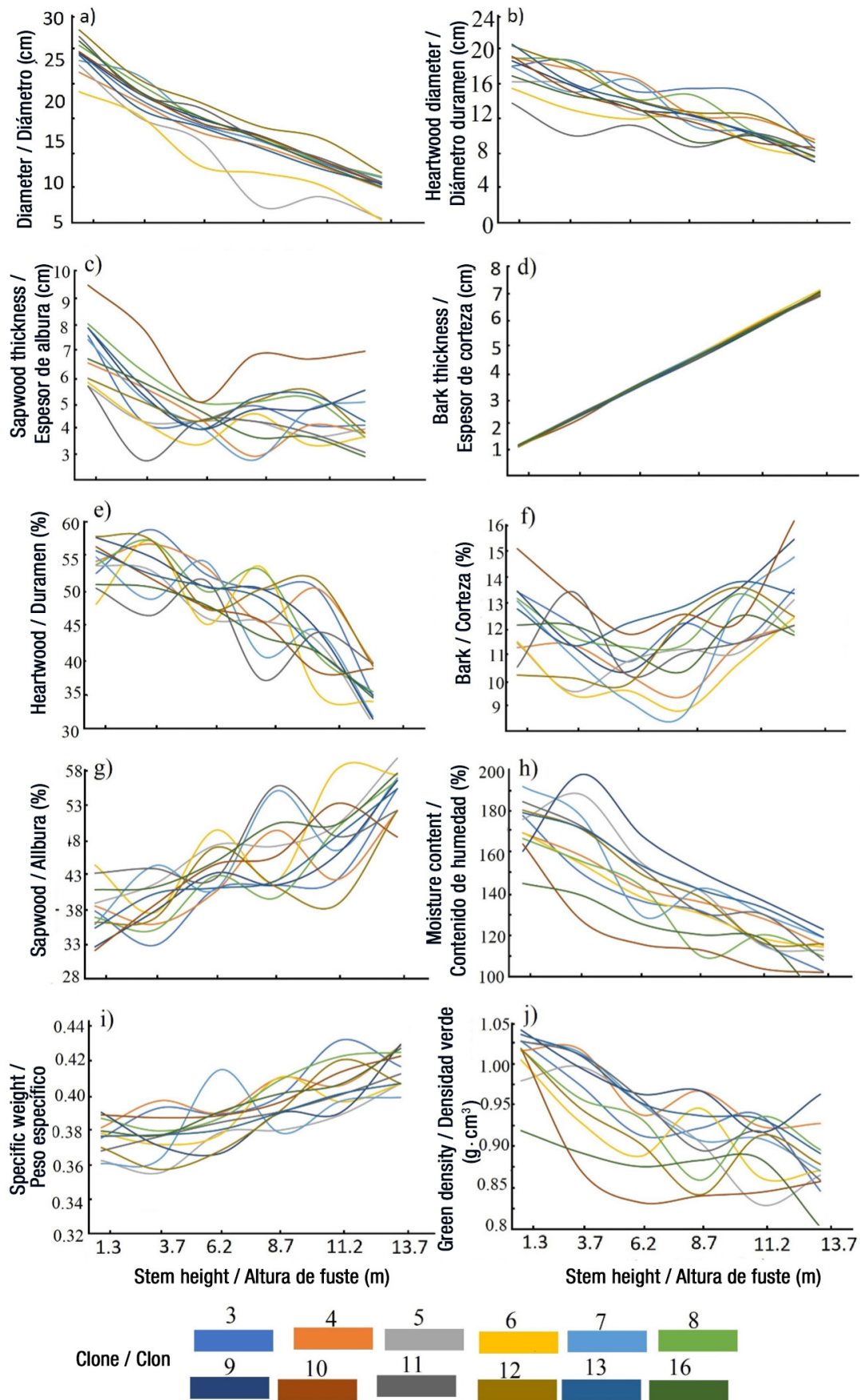


Figure 3. Morphological and physical parameters at different stem heights for 14 clones of *Gmelina arborea*.
 Figura 3. Parámetros morfológicos y físicos a diferentes alturas del fuste en 14 clones de *Gmelina arborea*.

height and the average variation is from 0.37 to 0.42 (Figure 3i). Finally, the average green density ranged from 0.88 g·cm⁻³ to 1.04 g·cm⁻³ and decreased with tree height (Figure 3j). In this parameter, clone 10 had lower green density and clones 9 and 4 had higher values.

Genetic analysis

According to Table 3, in the analysis of variance by components we observed that clone had no significant effect ($P > 0.05$) on specific gravity and green moisture, while the properties with the greatest variance were green density with 21.8 %, sapwood thickness with 17.2 % and bark percentage with 15.5 %. Regarding height, this factor had a significant effect on all variables ($P < 0.001$); those with the greatest variance were bark thickness with 82 %, total diameter with 78.2 %, heartwood percentage with 72.7 % and heartwood diameter with 71.3 %. On the other hand, there was no clone*height interaction, so this relationship had no significant influence on the variables studied and, therefore, the contribution to the variance was very low. In the case

entre árboles (Figura 3d), mientras que el espesor de albura varió entre 7.30 cm y 4.99 cm y disminuye con la altura con gran variación entre clones (Figura 3c), siendo el clon 10 el de mayor espesor. El porcentaje de corteza tiende a disminuir de la base hasta una altura de 7.5 m; posteriormente, aumenta hasta la parte más alta muestreada, nuevamente con una variación importante entre árboles (Figura 3f). El porcentaje promedio de albura se mantuvo en un rango de 36.08 % a 52.56 % y tiende a aumentar con respecto a la altura y sin tendencia clara entre los clones (Figura 3g).

En lo referente a las propiedades físicas, la Figura 3 también muestra que el contenido de humedad promedio en condición verde varía entre 182.68 % y 112.52 %, y disminuye con el aumento de la altura de los árboles (Figura 3h). En este parámetro se observa una tendencia entre los clones dependiendo las alturas; el clon 10 a todo lo largo del fuste tiene menor humedad y el clon 9 es el de contenido más alto. Con respecto al peso específico, este aumenta con la altura del árbol y la variación del promedio es de 0.37 a

Table 3. Analysis of variance and variance component for wood characteristics of 14 clones of *Gmelina arborea*.

Cuadro 3. Análisis de varianza y componente de varianza para las características de la madera de 14 clones de *Gmelina arborea*.

Variable / Variable	Clone / Clon		Height / Altura		Clone*Height / Clon*Altura		Error / Error	
	F-value / F-value	Variance (%) / Varianza (%)	F-value / F-value	Variance (%) / Varianza (%)	F-value / F-value	Variance (%) / Varianza (%)	F-value / F-value	Variance (%) / Varianza (%)
Volume / Volumen	5.03**	4.3	164.05**	85.3	0.23 ns	0	-	10.2
Total diameter / Diámetro total	4.14**	4.3	86.66**	78.2	0.00 ns	10.5	-	6.9
Heartwood diameter / Diámetro de duramen	9.18**	10.5	70.85**	71.3	0.00 ns	11.2	-	7.0
Sapwood thickness / Espesor de albura	8.17**	17.2	32.12**	60.8	0.00 ns	13.5	-	8.5
Bark thickness / Espesor de corteza	445.09**	1.8	23 268.6**	82.0	0.00 ns	10.1	-	6.0
Heartwood percentage / Porcentaje de duramen	5.89**	8.3	60.15**	72.7	0.65 ns	11.5	-	7.6
Sapwood percentage / Porcentaje de albura	4.91**	10.0	39.77**	69.8	0.56 ns	12.1	-	8.0
Bark percentage / Porcentaje de corteza	2.41**	15.5	9.00**	54.0	1.48 ns	16.8	-	13.7
Specific weight / Peso específico	1.97 ^{ns}	13.9	10.12**	61.7	0.41 ns	13.6	-	10.8
Moisture content / Contenido de humedad	1.85 ^{ns}	8.8	14.74**	65.6	1.30 ns	14.8	-	10.8
Green density / Densidad verde	382.78**	21.8	165.00**	21.0	0.00 ns	34.0	-	23.1

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ and ns: non-significant ($P > 0.05$).

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ y ns: no significativo ($P > 0.05$).

of error, the variables with the least contribution to the variance were bark thickness with 6.0 % and total diameter with 6.9 %.

Regarding the degree of genetic control, high individual heritability values were determined for heartwood percentage (H^2_{clon} greater than 0.10), while no significant values were found for other wood properties (Table 4). In addition to these low heritability values, high values of coefficient of genetic variation ($CV > 10\%$) were found for most properties (Table 4).

Figure 4 shows the analysis by ranking and selection index; according to this, the best clones were number 1, 7, 12 and 13, which were positioned in selection category 1, due to the top quality they reflected in their properties compared to the rest of the clones. On the other hand, the worst clone, according to the

0.42 (Figura 3i). Finalmente, la densidad verde promedio varió entre $0.88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $1.04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y disminuyó con la altura de árbol (Figura 3j). En este parámetro, el clon 10 presentó menor densidad verde y los clones 9 y 4 tuvieron valores más altos.

Análisis genético

De acuerdo con el Cuadro 3, en el análisis de varianza por componentes se observó que el clon no tuvo efecto significativo ($P > 0.05$) sobre el peso específico y la humedad en verde, mientras que las propiedades con mayor varianza fueron la densidad verde con 21.8 %, espesor de albura con 17.2 % y porcentaje de corteza con 15.5 %. Con respecto a la altura, este factor tuvo efecto significativo en todas las variables ($P < 0.001$); la de mayor varianza fueron el espesor de corteza con 82 %, diámetro total con 78.2 %, el porcentaje de dura-

Table 4. Heritability (H^2_{clon}) and coefficient of genetic variation ($CV_{\text{gi}}\%$) of wood characteristics of 14 clones of *Gmelina arborea*.

Cuadro 4. Heredabilidad (H^2_{clon}) y coeficiente de variación genética ($CV_{\text{gi}}\%$) de las características de la madera de 14 clones de *Gmelina arborea*.

Variables /Variables	$H^2_{\text{clon}}/H^2_{\text{clon}}$	$CV_{\text{gi}}\%$
Volume / Volumen	0.004313 ± 0.0379	9.1374
Total diameter / Diámetro total	0.007449 ± 0.0997	6.2058
Heartwood diameter / Diámetro de duramen	0.00657 ± 0.2789	67.3451
Sapwood thickness / Espesor de albura	0.070518 ± 0.3066	8.6029
Bark thickness / Espesor de corteza	0.010773 ± 0.1199	29.7299
Heartwood percentage / Porcentaje de duramen	0.102310 ± 0.369336	171.5681
Sapwood percentage / Porcentaje de albura	0.012807 ± 0.1307	20.9607
Bark percentage / Porcentaje de corteza	0.00215 ± 0.0452	5.5260
Specific weight / Peso específico	0.008974 ± 0.1094	92.7106
Moisture content / Contenido de humedad	0.043746 ± 0.2415	13.8030
Green density / Densidad verde	0.033646 ± 0.2118	347.0333

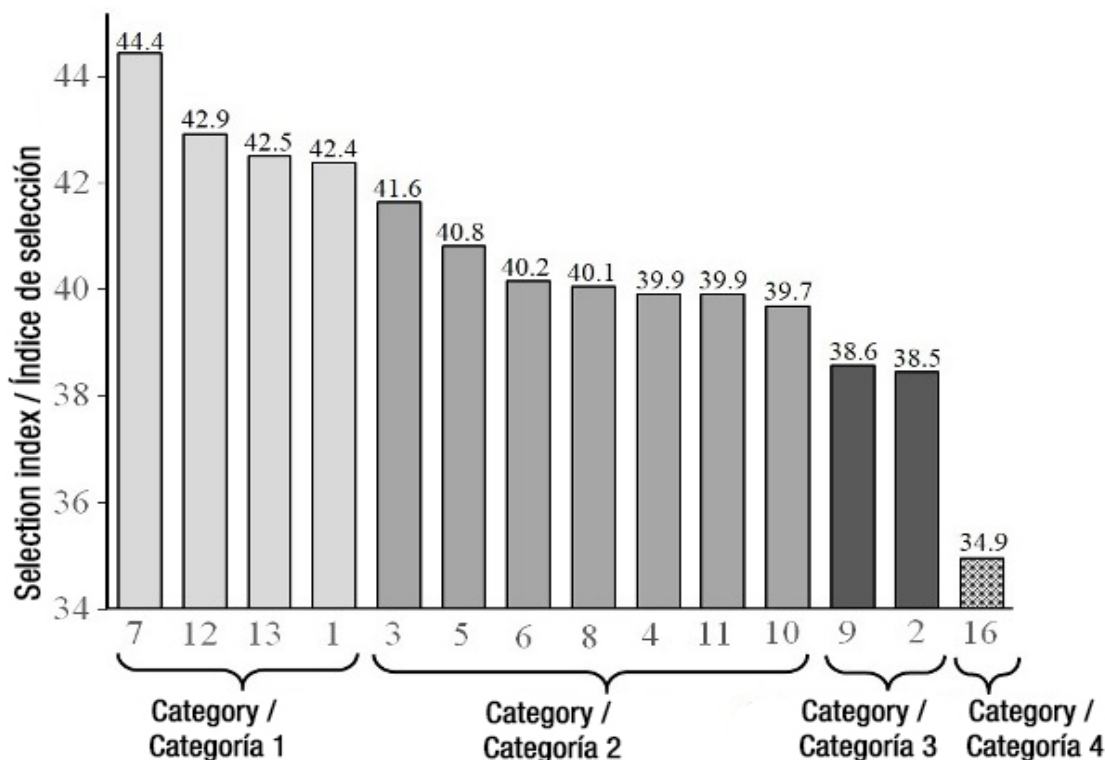


Figure 4. Selection index value based on wood properties of 14 clones of *Gmelina arborea* grown in Costa Rica.

Figura 4. Valor de índice de selección con base en las propiedades de la madera de 14 clones de *Gmelina arborea* cultivados en Costa Rica.

selection index, was number 16, entering in category 4, while the largest number of clones (3, 4, 5, 6, 8, 10 and 11) were grouped in category 2 (medium performance clones).

Discussion

Growth properties

DBH, total height, basal area and volume of *G. arborea* clones (Table 2) are comparable with other studies. Among them, Patil et al. (2017) reported an average DBH of 11.76 cm in 18-month-old clones; Kumar (2007) indicates DBH and average height of 7.2 cm and 5.18 m, respectively, in 24-month-old clones; and Hernández-Castro et al. (2021a, 2021b) recorded DBH values of 21 cm and commercial height of 9.63 m at 34 months. In the present study, slightly lower values of 24 cm DBH and 16.6 m in commercial height were obtained (Table 2) for 36-month-old clones. These comparisons indicate that the growth of the genotypes evaluated are higher or comparable to other studies in Costa Rica. Another important fact is that the clones evaluated showed no statistical differences ($P > 0.05$), which indicates that all the genotypes studied have optimal growth characteristics at 36 months of age.

men con 72.7 % y diámetro de duramen con 71.3 %. Por otra parte, no hubo interacción clon*altura, de modo que esta relación no influyó significativamente sobre las variables estudiadas y, por tanto, el aporte a la varianza fue muy bajo. En el caso del error, las variables con menos aportes a la varianza fueron espesor de corteza con 6.0 % y diámetro total con 6.9 %.

En cuanto al grado de control genético, se determinaron valores altos de heredabilidad individual para el porcentaje de duramen (H^2 clon mayor que 0.10), mientras que en otras propiedades de la madera no se encontraron valores significativos (Cuadro 4). Además de estos valores bajos de heredabilidad, se encontraron valores altos de coeficiente de variación genética ($CV > 10$ %) para la mayoría de las propiedades (Cuadro 4).

La Figura 4 muestra el análisis por ranking e índice de selección; de acuerdo con este, los mejores clones fueron el número 1, 7, 12 y 13 posicionándose en la categoría 1 de selección, debido a la superioridad que reflejaron en sus propiedades con respecto al resto de los clones. Por otro lado, el peor clon, según el índice de selección, fue el número 16 entrando en la categoría 4, mientras que la mayor cantidad de clones (3, 4, 5, 6, 8, 10 y 11) se agrupó en la categoría 2 (clones de medio desempeño).

Wood properties and variations

Decreasing total diameter, heartwood diameter and heartwood percentage when increasing the stem height of the clones is an intrinsic mechanism of tree growth (Taylor Gartner & Morrell, 2002). At the same time, it is important to note that the values of total diameter (23.93 to 14.24 cm), heartwood diameter (16.18 to 8.38 cm) and heartwood percentage (51.45 to 33.94 %) (Figure 3 a-c) are higher than those reported in the literature. For example, Hidayati et al. (2017) report diameters of 12.5 to 20.8 cm in five-year-old melina trees; Moya and Tomazello (2007) noted average diameters of 22.15 cm in nine- to 12-year-old trees. Moya (2004) reported 50 to 70 % heartwood in 12-year-old trees, while in the present study, the percentage of heartwood remained between 40 and 50 % with early-aged clones (three years old). Thus, Moya and Tomazello (2007) demonstrated that cloned trees have a significant amount of heartwood at an early age and that, probably, at the end of the rotation, the percentage of heartwood is higher, since it increases with tree age (Rodríguez-Pérez et al., 2022).

The behavior of the sapwood, which increases in thickness and percentage with increasing tree height (Figure 3b and 3e), is typical in trees. The sapwood is the part with living cells that transpires and contains starch as an energy reserve (Taylor et al., 2002).

Bark, on the other hand, has the function of protection in the tree and decreases in relation to stem height (Paine et al., 2010; Wilson & Witkowski, 2003), as was the case in the melina clones in this study (Figure 3f). This behavior is consistent with other reports for several species in 13-year-old plantation trees (Tenorio et al., 2016). However, this variation along the stem was minimal, which is explained by Wilson and Witkowski (2003), who mention that bark variation is low during the first years of growth before flowering. This suggests no need for the tree to invest a lot of energy in creating a thick tissue in the first years of growth (Wilson & Witkowski, 2003).

Regarding the physical properties of wood, it is well known that specific weight is one of the most important in terms of quality (Moya, 2004). However, there are few studies that relate this parameter to the genetic origin of trees in broadleaf species (Rodríguez-Pérez et al., 2022). Studies in tropical species report that specific weight decreases with stem height (Pande & Singh, 2005; Rodríguez-Pérez et al., 2022; Weber & Sotelo-Montes, 2008)), a situation that differs from this study where it was observed that values increase with stem height (Figure 3g). Zobel and Van Buijtenen (1989) indicate that the decrease in specific weight with height is not clearly established, since there is significant variation among

Discusión

Propiedades de crecimiento

El DAP, altura total, área basal y volumen de los clones de *G. arborea* (Cuadro 2) son comparables con otros estudios. Entre ellos, Patil et al. (2017) reportaron un DAP promedio de 11.76 cm en clones de 18 meses; Kumar (2007) indica DAP y altura promedio de 7.2 cm y 5.18 m, respectivamente, en clones de 24 meses; y Hernández-Castro et al. (2021a, 2021b) registraron valores de DAP de 21 cm y altura comercial de 9.63 m a los 34 meses. En el presente estudio se obtuvieron valores ligeramente inferiores a los 24 cm de DAP y 16.6 m en altura comercial (Cuadro 2) para clones de 36 meses de edad. Estas comparaciones indican que el crecimiento de los genotipos evaluados es superior o semejante con otros estudios en Costa Rica. Otro dato importante es que los clones evaluados no presentaron diferencias estadísticas ($P > 0.05$), lo cual indica que todos los genotipos estudiados presentan características óptimas de crecimiento a los 36 meses de edad.

Propiedades de la madera y su variación

La disminución del diámetro total, diámetro de duramen y porcentaje de duramen, al incrementar la altura del fuste de los clones, es un mecanismo intrínseco del crecimiento del árbol (Taylor Gartner & Morrell, 2002). A su vez, es importante señalar que tanto los valores de diámetro total (23.93 a 14.24 cm), diámetro de duramen (16.18 a 8.38 cm) y porcentaje de duramen (51.45 a 33.94 %) (Figura 3 a-c) son superiores a los reportados en la literatura. Por ejemplo, Hidayati et al. (2017) reportan diámetros de 12.5 a 20.8 cm en árboles de melina de cinco años; Moya y Tomazello (2007) señalaron diámetros promedio de 22.15 cm en árboles de nueve a 12 años. Moya (2004) indicó 50 a 70 % de duramen en árboles de 12 años, mientras que, en el presente estudio, el porcentaje de duramen se mantiene entre 40 y 50 % con clones de temprana edad (tres años). De esta forma, Moya y Tomazello (2007) demostraron que los árboles clonados poseen cantidad importante de duramen a temprana edad y que, probablemente, al finalizar el turno de rotación, el porcentaje de duramen es mayor, ya que este incrementa con la edad del árbol (Rodríguez-Pérez et al., 2022).

El comportamiento de la albura, la cual aumenta su espesor y porcentaje con el incremento en altura del árbol (Figura 3b y 3e), es típico en los árboles. La albura es la parte que contiene células vivas que realizan la transpiración y contiene almidón como reserva de energía (Taylor et al., 2002).

Por su parte, la corteza tiene la función de protección en el árbol y disminuye en relación con la altura del fuste

species and an important genetic effect that can be attributed to the origin of the materials.

Regarding moisture and green density, both variables decreased with increasing stem height (Figure 3f and 3h), which differs with that reported by Rodríguez-Pérez et al. (2022) and Tenorio et al. (2016) in fast-growing tropical species. However, Arguedas et al. (2018) report that changes in moisture contents depend on factors such as time and site of sampling and tree age, so a fixed variation of moisture content along the stem is not established. Moisture appears to be mainly concentrated in the lower part of the stem in this study.

Genetic analysis

Genetic analysis showed that green density, sapwood thickness and bark thickness are the significant variables with the highest variance in the clone factor (Table 3). Zobel and Jett (1995) and Zobel and Van Buijtenen (1989) mentioned that the inner tissues of the tree (bark, sapwood and heartwood) are usually affected by the environment and growing conditions; for example, water availability affects tree density, in some cases increasing it and in others decreasing it. Heartwood percentage showed the highest heritability value (Table 4), confirming that this property has the highest heritability in many species (Ioannidis & Koropouli, 2023), a value classified as high according to Nunes et al. (2016). This high heartwood heritability is important in species used in reforestation, because this type of wood affects mechanical properties, aesthetic quality and durability (Li et al., 2017). Thus, the development of trees with adequate values of these properties at the early stages of improvement programs, as in the case of the present study, will increase the potential of the species for wood marketing (Abarca-Alvarado et al., 2023).

Another important value is the coefficient of clonal variation, which, according to Resende (2002), allows us to know the genetic variability that exists within the material. In this study, heartwood percentage, specific gravity and green density (Table 4) had the highest coefficients of variation, which according to Hernandez-Castro et al. (2021b) is because the environmental factor is low or not very visible in these properties at early ages.

Heritability and genetic coefficients of variation for wood properties showed moderate to very high values (Table 4). These results allow inferring, from relatively early ages, that it is possible to start with the selection process to have trees with adequate properties in the future; however, this should be taken with caution, because genetic control increases with age (Gion et al., 2011; Hernández-Castro et al. 2021a). Therefore, it is necessary to continue with measurements in these

(Paine et al., 2010; Wilson & Witkowski, 2003), como sucedió en los clones de melina en este estudio (Figura 3f). Este comportamiento es consistente con otros reportes de varias especies en árboles de plantaciones de 13 años (Tenorio et al., 2016). No obstante, dicha variación a lo largo del fuste fue mínima, lo cual es explicado por Wilson y Witkowski (2003), quienes mencionan que la variación de la corteza es baja durante los primeros años de crecimiento antes de la floración. Esto sugiere que no hay necesidad de que el árbol invierta tanta energía en crear un tejido grueso en los primeros años (Wilson & Witkowski, 2003).

Respecto a las propiedades físicas de la madera, es bien conocido que el peso específico es una de las más importantes en cuestión de calidad (Moya, 2004). A pesar de ello, existen pocos estudios que relacionan este parámetro con el origen genético de los árboles en especies latifoliadas (Rodríguez-Pérez et al., 2022). Los estudios en especies tropicales reportan que el peso específico disminuye con la altura del fuste (Pande & Singh, 2005; Rodríguez-Pérez et al., 2022; Weber & Sotelo-Montes, 2008), situación que difiere del presente trabajo donde se observó que los valores aumentan con la altura del fuste (Figura 3g). Zobel y Van Buijtenen (1989) señalan que la disminución de peso específico con la altura no está claramente establecida, ya que existe variación significativa entre las especies y efecto genético importante atribuible a la procedencia de los materiales.

Con respecto a la humedad y densidad en verde, ambas variables disminuyeron con el aumento de la altura del fuste (Figura 3f y 3h), lo cual difiere con lo señalado por Rodríguez-Pérez et al. (2022) y Tenorio et al. (2016) en especies tropicales de crecimiento rápido. No obstante, Arguedas et al. (2018) señalan que los cambios en los contenidos de humedad dependen de factores como la época y sitio de muestreo y la edad de los árboles, por lo que no se establece una variación fija del contenido de humedad a lo largo del fuste. En el presente estudio, parece que la humedad se concentra principalmente en la parte inferior del fuste.

Análisis genético

El análisis genético mostró que la densidad verde, espesor de albura y corteza son las variables significativas con mayor varianza en el factor clon (Cuadro 3). Zobel y Jett (1995) y Zobel y Van Buijtenen (1989) mencionan que los tejidos internos de árbol (corteza, albura y duramen) generalmente son afectados por el medio ambiente y las condiciones de crecimiento; por ejemplo, la disponibilidad del agua que afecta la densidad del árbol, en algunos casos la aumenta y en otros la disminuye. El porcentaje de duramen presentó el mayor valor de heredabilidad (Cuadro 4), lo que confirma

genetic trials to determine the optimal age for selection.

Regarding genetic ranking, four genetic categories were identified (Figure 4). This is very important because, as mentioned by Hernández-Castro et al. (2021b), the practical usefulness of genetic ranking, in addition to allowing the projection of potential genetic gains, indicates when to carry out evaluations in order to verify the elite clones with obvious quality of properties and thus support genetic improvement programs of the species with greater certainty. Also, this classification allows to know fast, medium and slow growing clones that address the objectives of forest production (Makouanzi et al., 2018). Applying this to the present study, clones 7, 12, 13 and 1 of *G. arborea* showed higher growth than the other clones studied at 36 months of age (Figure 4). Therefore, these clones show potential for further genetic improvement of this species in reforestation programs based on the properties of the wood.

Conclusions

The 36-month-old *Gmelina arborea* clones had slightly greater diameter, height and volume than other trees from plantations under different conditions. Wood properties, for the most part, were little affected by clone selection; specifically, clones had no effect on specific gravity and moisture content. The results showed that wood properties have low heritability, a situation attributed to the early age of the trial, in which the genetics of the tree have not yet been fully developed. Nevertheless, the heartwood already shows heritability; this represents an advantage, since this property, of importance in industrial processes, can increase with age. Lastly, although the analysis was carried out at an early age, clones 7, 12, 13 and 1 were higher regarding growth and some wood properties; these clones show potential for further genetic improvement of *G. arborea* in reforestation programs.

Acknowledgments

The authors thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) for its funding support.

que esta propiedad es la de mayor heredabilidad en muchas especies (Ioannidis & Koropouli, 2023), valor clasificado como alto según Nunes et al. (2016). Esta alta heredabilidad del duramen es importante en especies utilizadas en reforestación, ya que este tipo de madera afecta las propiedades mecánicas, calidad estética y durabilidad (Li et al., 2017). Así, el desarrollo de árboles con valores adecuados de dichas propiedades en las etapas iniciales de programas de mejoramiento, como el caso del presente estudio, permitirá aumentar el potencial de la especie para la comercialización de la madera (Abarca-Alvarado et al., 2023).

Otro valor importante es el coeficiente de variación clonal, el cual, según Resende (2002), permite conocer la variabilidad genética que existe dentro del material. En el presente trabajo, el porcentaje de duramen, peso específico y densidad verde (Cuadro 4) presentaron los coeficientes de variación más altos, panorama que según Hernández-Castro et al. (2021b) se da porque el factor ambiental es bajo o poco visible en estas propiedades a edades tempranas.

La heredabilidad y los coeficientes genéticos de variación para las propiedades de la madera mostraron valores moderados a muy altos (Cuadro 4). Estos resultados permiten inferir, desde edades relativamente tempranas, que es posible iniciar con el proceso de selección para contar a futuro con árboles de propiedades adecuadas; sin embargo, esto debe tomarse con precaución, ya que el control genético aumenta con la edad (Gion et al., 2011; Hernández-Castro et al. 2021a). En este sentido, es necesario continuar con las mediciones en estos ensayos genéticos con el fin de determinar la edad óptima de selección.

Con relación al *ranking* genético, se identificaron cuatro categorías genéticas (Figura 4). Esto es de suma importancia, ya que como mencionan Hernández-Castro et al. (2021b), la utilidad práctica del *ranking* genético, además de permitir la proyección de ganancias genéticas potenciales, permite indicar en qué momento hacer evaluaciones con el fin de verificar los clones élite con superioridad clara de propiedades y de esta forma apoyar los programas de mejoramiento genético de la especie con mayor certeza. Del mismo modo, la clasificación permite conocer clones de rápido, mediano y lento crecimiento que direccionen los objetivos de producción forestal (Makouanzi et al., 2018). Aplicando esto al presente estudio, los clones 7, 12, 13 y 1 de *G. arborea* presentaron superioridad de crecimiento con respecto a los demás clones estudiados a los 36 meses de edad (Figura 4). Por tanto, dichos clones presentan potencial para seguir mejorando genéticamente esta especie en los programas de reforestación con base en las propiedades de las maderas.

End of English version

References / Referencias

- Ataguba, C. O., Enwelu, C., Aderibigbe, W., & Okiwe, E. O. (2015). A comparative study of some mechanical properties of *Gmelina arborea*, *Parkia biglobosa* and *Prosopis africana* timbers for structural use. *International Journal of Technical Research and Applications*, 3(3), 320–324. <https://www.ijtra.com/view/a-comparative-study-of-some-mechanical-properties-of-gmelina-arborea-parkia-biglobosa-and-prosopis-africana-timbers-for-structural-use.pdf>
- Abarca-Alvarado, M., Moya, R., Chinchilla-Mora, O., & Avila-Arias, C. (2023). Control of wood properties, drying and workability of nine 8-year-old clones of *Swietenia macrophylla* King grown in Costa Rica. *Cellulose Chemistry and Technology*, 57(3-4), 213–226. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.21>
- Arguedas, M., Rodríguez-Solis, M., Moya, R., & Berrocal, A. (2018). *Gmelina arborea* “death disease” in fast-growth plantations: Effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality. *Forest Systems*, 27(1), e003. <https://doi.org/10.5424/fs/2018271-12236>
- ASTM International. (2022a). *Standard Methods of testing small clear specimens of timber. ASTM D-143-22*. <https://doi.org/10.1520/D0143-22>
- ASTM International. (2022b). *Standard Test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. D5865M-22*. <https://doi.org/10.1520/D2395-17R22>
- Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., Murillo-Gamboa, O., & Sandoval-Sandoval, C. (2014). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28), 23. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v12i28.2097>
- Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., Murillo-Gamboa, O., & Sandoval-Sandoval, C. (2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(29), 02. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/2250/2033>
- Borpuzari, P. P., & Kachari, J. (2019). Clonal propagation of *Gmelina arborea* Roxb. An important multipurpose tree species of north eastern region. *International Journal of Herbal Medicine*, 7(6), 10–15. <https://www.florajournal.com/archives/2019/vol7issue6/PartA/7-4-51-530.pdf>
- Dehaspe, J., Venegas Cordero, N., Chavarría-Palma, A., & Capell, R. (2022). Projected climate change impacts on tropical life zones in Costa Rica. *Progress in Physical Geography*, 46(2), 180–200. <https://doi.org/10.1177/030913332111047046>
- Gion, J.-M., Carouché, A., Deweer, S., Bedon, F., Pichavant, F., Charpentier, J.-P., & Plomion, C. (2011). Comprehensive genetic dissection of wood properties in a widely-

Conclusiones

Los clones de *Gmelina arborea* de 36 meses de edad presentan diámetro, altura y volumen ligeramente superiores a otros árboles de plantaciones en condiciones distintas. Las propiedades de la madera, en general, fueron poco afectadas por la selección de los clones; específicamente, estos no tuvieron efecto sobre el peso específico y la humedad. Los resultados mostraron que las propiedades de la madera presentan poca heredabilidad, situación que se atribuye a la edad temprana del ensayo, en el cual aún no ha expresado completamente la genética del árbol. No obstante, el duramen ya evidencia heredabilidad; esto representa una ventaja, ya que dicha propiedad, de importancia en los procesos industriales, puede aumentar con la edad. Finalmente, aunque el análisis se hizo a edad temprana, los clones 7, 12, 13 y 1 fueron superiores considerando el crecimiento y algunas propiedades de la madera; estos clones presentan potencial para seguir mejorando genéticamente *G. arborea* en los programas de reforestación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por su apoyo económico.

Fin de la versión en español

- grown tropical tree: *Eucalyptus*. *BMC Genomics*, 12(1), 301. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-301>
- Hernández-Castro, W., Badilla Valverde, Y., & Murillo-Gamboa, O. (2021a). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Uniciencia*, 35(1), 352–366. <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.22>
- Hernández-Castro, W., Murillo-Gamboa, O., & Badilla-Valverde, Y. (2021b). Selección temprana en ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea* Robx.) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 93–106. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.42069>
- Hidayati, F., Ishiguri, F., Makino, K., Tanabe, J., Aiso, H., Prasetyo, V. E., & Yokota, S. (2017). The effects of radial growth rate on wood properties and anatomical characteristics and an evaluation of the xylem maturation process in a tropical fast-growing tree species, *Gmelina arborea*. *Forest Products Journal*, 67(3–4), 297–303. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-16-00027>
- Ioannidis, K., & Koropouli, P. (2023). Quantitative genetic parameters of heartwood and its chemical traits in a black pine (*Pinus nigra* JF Arnold) clonal seed orchard established in Greece. *New Zealand Journal*

- of *Forestry Science*, 53. doi: <https://doi.org/10.33494/nzjfs532023x249x>
- Iwuoha, S. E., Seim, W., & Onyekwelu, J. C. (2021). Mechanical properties of *Gmelina arborea* for engineering design. *Construction and Building Materials*, 288, 123123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123123>
- Kaith, M., Tirkey, P., Bhardwaj, D. R., Kumar, J., & Kumar, J. (2023). Carbon sequestration potential of forest plantation soils in eastern plateau and hill region of India: a promising approach toward climate change mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(6), 341. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06364-y>
- Kumar, A. (2007). Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Silvae Genetica*, 56(1-6), 32–36. <https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040940.32574.22>
- Li, C., Weng, Q., Chen, J.-B., Li, M., Zhou, C., Chen, S., & Gan, S. (2017). Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. *New Forests*, 48(1), 33–49. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9554-4>
- Makouanzi, G., Chaix, G., Nourissier, S., & Vigneron, P. (2018). Genetic variability of growth and wood chemical properties in a clonal population of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* in the Congo. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 80(2), 151–158. <https://doi.org/10.2989/20702620.2017.1298015>
- Moya, R. (2004). Effect of management treatment and growing regions on wood properties of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests*, 28(2-3), 325–330. <https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040965.76119.bc>
- Moya, R., & Tomazello, M. (2007). Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate. *Revista Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(3), 267–276. <https://doi.org/10.5424/srf/2007163-01015>
- Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., & Esquivel-Segura, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), 1–189.
- Nunes, A. C. P., Santos, G. A., Resende, M. D. V., Silva, L. D., Higa, A., & Assis, T. F. (2016). Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul. *Scientia Forestalis*, 44(111), 563–574. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.03>
- Ortega-Ramírez, M. E., Castro-Osorio, A., Torres-Lamas, S., & González-Cortés, N. (2022). Clonal propagation of *Gmelina arborea* Roxb. grown in southeastern Mexico. *Agro Productividad*, 13(9), 1–10. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i5.1870>
- Paine, C. E. T., Stahl, C., Courtois, E. A., Patiño, S., Sarmiento, C., & Baraloto, C. (2010). Functional explanations for variation in bark thickness in tropical rain forest trees. *Functional Ecology*, 24(6), 1202–1210. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01736.x>
- Pande, P. K., & Singh, M. (2005). Inter-clonal, intra-clonal, and single tree variations of wood anatomical properties and specific gravity of clonal ramets of *Dalbergia sissoo* Roxb. *Wood Science and Technology*, 39(5), 351–366. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0273-1>
- Patil, Y. B., Saralch, H. S., Chauhan, S. K., & Dhillon, G. P. S. (2017). Effect of growth hormone (IBA and NAA) on rooting and sprouting behaviour of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Indian Forester*, 143(2), 81–85. https://www.researchgate.net/profile/Gurvinder-Pal-Dhillon/publication/317401593_Effect_of_growth_hormone_IBA_and_NAA_on_rooting_and_sprouting_behaviour_of_Gmelina_arborea_Roxb/links/5a2a41eca6fdccfbf81be9e/Effect-of-growth-hormone-IBA-and-NAA-on-rooting-and-sprouting-behaviour-of-Gmelina-arborea-Roxb.pdf
- Pinnschmidt, A., Yousefpour, R., Nölte, A., Murillo, O., & Hanewinkel, M. (2023). Economic potential and management of tropical mixed-species plantations in Central America. *New Forests*, 54(3), 565–586. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09937-7>
- Resende, M. D. (2016). Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16(4), 330–339. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Resende, M. D. (2002). Biometric and statistical genetics in perennial plant breeding= genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Embrapa Florestas. <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=306061&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22RESENDE,%20M.%22&qFacets=autoria:%22RESENDE,%20M.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>
- Rocha, O. J., Méndez, L., Alvarez, D., Rojas-Parajeles, F., & Murillo-Gamboa, O. (2020). Isolation and characterization of fifteen microsatellite loci for the use in breeding of *Gmelina arborea* Roxb. (Lamiaceae). *Genetic Resources*, 1(2), 23–28. <https://doi.org/10.46265/genresj.LLTJ1737>
- Rodríguez-Pérez, D., Moya, R., Murillo, O., Gaitán-álvarez, J., & Badilla-Valverde, Y. (2022). Variation and genetic control of the heartwood, sapwood, bark, wood color parameter, and physical and mechanical properties of *Dipteryx panamensis* in Costa Rica. *Forests*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/f13010106>
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability - A review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587–611. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/539/539>
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 71–84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100008>
- Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., & Romo-Lozano, J. L. (2016). Modelos biométricos forestales en Hidalgo, México: estado

- del arte. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 351–367. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.09.043>.
- Weber, J. C., & Sotelo-Montes, C. (2008). Geographic variation in tree growth and wood density of *Guazuma crinita* Mart. in the Peruvian Amazon. *New Forests*, 36(1), 29–52. <https://doi.org/10.1007/s11056-007-9080-5>
- Wilson, B. G., & Witkowski, E. T. F. (2003). Seed banks, bark thickness and change in age and size structure (1978-1999) of the African savanna tree, *Burkea africana*. *Plant Ecology*, 167(1), 151–162. <https://doi.org/10.1023/A:1023999806577>
- Zobel, B. J., & Jett, J. B. (1995). The role of genetics in wood production – General Concepts. In *Genetics of wood production* (pp. 1–25). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5_1
- Zobel, B. J., & van Buijtenen, J. P. (1989). Wood variation and wood properties. In *Wood variation. Its causes and control* (pp. 1–32). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5_1