



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Análisis tecnológico en *Gmelina arborea* Roxb. proveniente de rodales juveniles puros y mezclados en México

### Technological Analysis of *Gmelina arborea* Roxb. from Pure and Combined Juvenile Stands in Mexico

Efrén Hernández-Álvarez<sup>a</sup>, Bayron A. Ruiz-Blandon<sup>a,b</sup>,  
Martín Gómez-Cárdenas<sup>c</sup>, Gerónimo Quiñonez-Barraza<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Producción Forestal. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), Universidad de Guadalajara (UdeG). Zapopan, Jalisco, México. [ROR](#)

<sup>b</sup> Campo Experimental Santiago Ixcuintla, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Nayarit, México. [ROR](#)

<sup>c</sup> Campo experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Michoacán, México. [ROR](#)

<sup>d</sup> Campo Experimental Valle del Guadiana, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Durango, México. [ROR](#)

Autor de correspondencia

**Recibido:** 29 de septiembre 2023

**Aceptado:** 14 de marzo de 2024

**Citación:** Hernández-Álvarez, E., Ruiz-Blandon, B. A., Gómez-Cárdenas, M. & Quiñonez-Barraza, G. (2024). Análisis tecnológico en *Gmelina arborea* Roxb. proveniente de rodales juveniles puros y mezclados en México. *Colombia Forestal*, 27(2), e21313. <https://doi.org/10.14483/2256201X.21313>

---

### Highlights

- Los rodales mezclados son más diversos y productivos que los puros.
  - *G. arborea* en rodales mezclados produce más biomasa que los puros.
  - *G. arborea* en rodales mezclados mejora el incremento en diámetro.
  - Árboles de *G. arborea* con mayor altura presentan mayor flexibilidad mecánica.
  - *G. arborea* con mayor diámetro son rígidos en términos mecánicos.
-

## Resumen

*Gmelina arborea* es una especie que ostenta valor económico en los mercados forestales, esencialmente por la versatilidad de su biomasa, su rápido crecimiento y la calidad de su madera. Los objetivos principales de esta investigación fueron evaluar la dendrometría, la biomasa, el suelo y las propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos rodales de 18 años. En parcelas rectangulares de 1000 m<sup>2</sup> se recabó información dasométrica de 20 árboles, además de fracciones de madera para ensayos físicos-mecánicos en laboratorio. En términos estadísticos, la *G. arborea* del rodal mezclado presentó mayor diámetro (7.3 %) y biomasa del fuste (5.1 %), además de un impacto en las propiedades mecánicas (8.1 %) y la dureza en sus diferentes ejes (long. 6.2 %, rad. 1.5 % y tang. 6.3 %). Se deduce que los rodales mezclados contribuyen a una mayor biomasa y a madera de mejor resistencia y calidad en *G. arborea*.

**Palabras clave:** biomasa del fuste, diámetro normal, físico-mecánico, rodal puro, rodal mezclado.

## Abstract

*Gmelina arborea* is a species that holds economic value in forest markets, primarily due to the versatility of its biomass, rapid growth, and timber quality. The main objective of this research was to evaluate the dendrometry, biomass, soil, and the physical and mechanical properties of the wood in two 18-year-old stands. In rectangular plots of 1000 m<sup>2</sup>, dasometric information from 20 trees was collected, in addition to wood fractions for physical-mechanical tests in the laboratory. Statistically, mixed-stand *G. arborea* exhibited a larger diameter (7.3%) and stem biomass (5.1%), as well as an impact on mechanical properties (8.1%) and hardness on its various axes (long. 6.2%, rad. 1.5%, and tang. 6.3%). It is inferred that mixed stands contribute to greater biomass and better resistance and quality of wood in *G. arborea*.

**Keywords:** stem biomass, normal diameter, physical-mechanical, pure stand, mixed stand.

## INTRODUCCIÓN

*Gmelina arborea* Roxb ex Sm es una especie de origen asiático perteneciente a la familia Lamiaceae, crece en zonas entre húmedas y secas, y normalmente se asocia con *Terminalia tomentosa* (Roxb. ex DC.) Wight & Arn. y *Tectona grandis* L.f. (Dhakulkar *et al.*, 2005; GRIN, 2023a). Debido a la calidad de la madera y la maleabilidad de la biomasa, esta especie es importante a nivel forestal (Moya, 2001) por su crecimiento rápido y porque se desarrolla entre 18 y 35 °C, con una precipitación entre 1778 y 2286 mm y un 40 % humedad. Además, *G. arborea* se adapta a diferentes tipos de suelos, lo cual ha permitido su amplia distribución en áreas tropicales (Onyekwelu, 2004; GRIN, 2023a).

*G. arborea* es una especie introducida en México desde 1998 en rodales forestales comerciales (RFC) de los estados pioneros de Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas, Yucatán, Nayarit, Guerrero, Quintana Roo y Campeche, por lo cual alberga una superficie total plantada aproximada de 65 367.4 ha y representa el 22.1 % del volumen maderable en México (CONAFOR, 2012, 2013). A 2023, la superficie plantada con RFC ha incrementado alrededor de 5.6 veces, incorporándose los estados de Michoacán, Puebla, Coahuila, San Luis Potosí y Zacatecas (SEMARNAT & CONAFOR, 2023).

Los rodales puros (RP) y mezclados (RM) son recurrentemente analizados por su impacto en el ámbito forestal (Forrester *et al.*, 2013). México es uno de los países con mayor diversidad en cuanto al uso de la biomasa en especies maderables, si bien las exigencias de la calidad en la madera son altas cuando provienen de rodales juveniles, lo que varía según la densidad de plantación y origen (Rodríguez *et al.*, 2014; Romo-Lozano *et al.*, 2017).

La eficiencia en la producción de madera en *G. arborea* depende de su compatibilidad en el sistema de plantación y sus condiciones edafoclimáticas y de manejo. Por consiguiente, este estudio planteó como hipótesis que *G. arborea*, al crecer en sistemas de RM, mejora la calidad de la madera en algunos aspectos asociados con la proximidad de los rodales (RP) y las condiciones del sitio. Los objetivos principales de esta investigación fueron: 1) evaluar la dasometría y la biomasa del fuste en la especie, 2) determinar las propiedades del suelo en los RP y RM y 3) determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos rodales comerciales de 18 años en Nayarit, México.

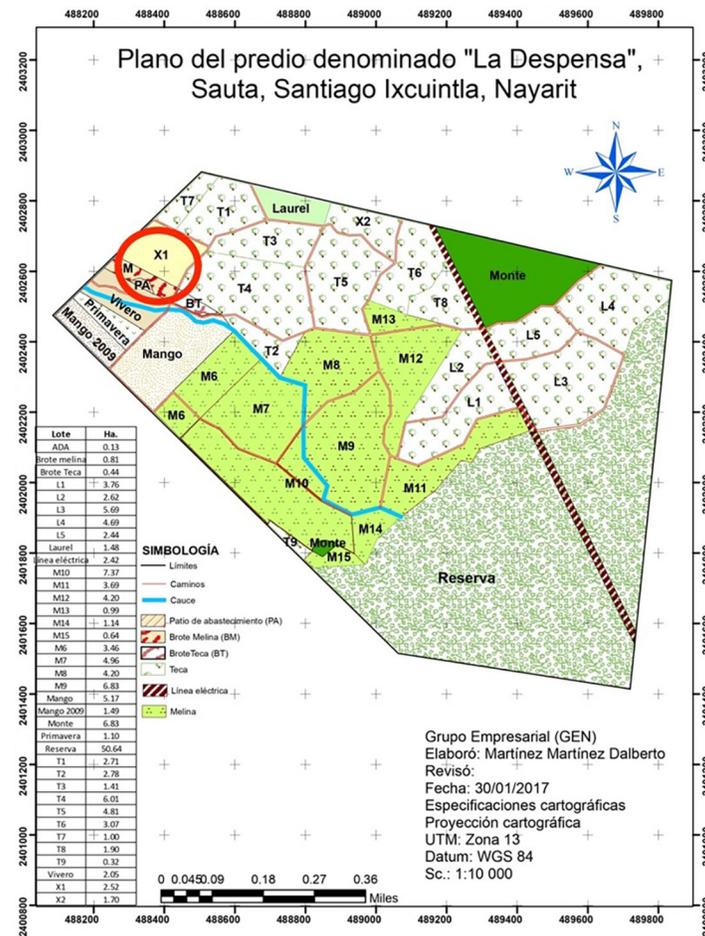
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El RP y el RM, de 18 años (plantados en el año 2001), son administrados por la empresa Agroforestales Nayarita, ubicados en el Municipio de Santiago Ixcuintla, Nayarit, y geolocalizados en 21°43'35.7" N, 105°06'47.1" O y 21°43'38.3" N, 105°06'46.4" O (Figura 1). Según Köppen (modificado por García, 1987), el clima de la zona es cálido sub-húmedo de humedad media (Aw1 (w)). El sitio está ubicado entre 0 y 800 m de altitud. La temperatura promedio anual es de 24 °C (abril y julio son los meses más cálidos) y la precipitación total de 1529 mm (INEGI, 2017). Los suelos son cambisoles epilépticos (cm lep), y la vegetación dominante es la selva baja caducifolia (Soil Taxonomy, 2014).

La superficie total plantada del RP fue de 12.8 ha y la del RM de 20.4 ha. Guayaquil (*Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms (GRIN, 2023c) y Laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (GRIN, 2023b) constituyeron estos sistemas de rodal. Los rodales se establecieron en lotes adyacentes a 5 m de distancia en condiciones de sitio similares.

Cuando se preestablecieron el RP y el RM, se aprovechó la cobertura vegetal existente. Posteriormente, se aplicaron Goal XL2 (oxifluorfén) y glifosato para el control de arvenses. Antes de establecer los rodales, se realizaron análisis físicos y químicos edáficos (año 2001), los cuales indicaron una textura franco-arcillosa con dificultades de compactación. Los rodales mostraron ser altos en materia orgánica (MO) y con pH entre 5.7 y 6.0. La presencia del N (N-NO<sub>3</sub>) fue mediana, la de P (P-Bray) muy baja, la de K, Mg, Fe y Ca muy alta y la de Na, Mn y Cu muy baja. En vista de ello, se aplicaron 2 Mg.ha<sup>-1</sup> de cal agrícola y gallinaza y se realizó fertilización de N-P-K (50-120-25) combinado con 250 kg de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (18-46-00), 24 kg de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (00-00-50) y 20 kg de KCl (00-00-60) al mes de haber establecido las plántulas. Este plan de fertilización fue llevado a cabo una vez en 2001.



**Figura 1.** Localización de rodales comerciales de *G. arborea* (círculo rojo) de 18 años en el municipio de Santiago Ixcuintla, estado de Nayarit, México

El manejo de los rodales se basó en los parámetros establecidos por la [CONAFOR \(2000\)](#). Las plántulas, con 20 cm en *h* y 8 mm de diámetro, se trasplantaron al sitio, donde se aplicó un sistema de plantación marco real (3 x 3 m; densidad de plantación = 1111 árboles.ha<sup>-1</sup> en el RP y el RM –aquí, 300 árboles.ha<sup>-1</sup> fueron de *G. arborea*). En el RP y el RM se practicaron cortas parciales, tres en el RP (5, 10 y 15 años, extracción del 85 %) y dos en RM (7 y 15 años, extracción del 65 %). En el año 2019, la densidad final por rodal fue de 232 árboles.ha<sup>-1</sup> en el RP y de 482 árboles.ha<sup>-1</sup> en el RM, constituido por 200 árboles.ha<sup>-1</sup> de *P. guachapele*, 152 árboles.ha<sup>-1</sup> de *C. alliodora* y 130 árboles.ha<sup>-1</sup> de *G. arborea*.

## Dasometría

En el RP y el RM se establecieron tres parcelas de 40 m x 25 m (1000 m<sup>2</sup>) distribuidas aleatoriamente. Se registraron datos de altura total (*h*) de los árboles con un hipsómetro Haga Leica E7100i 200 Ft a 20 m, así como de distancia y diámetro normal (DN) de la base hasta 1.30 m con la forcípula Mantax Blue Haglöf.

Se tomaron 20 árboles ( $n = 20$ ) por parcela y se estimó el área basal ( $AB$ ) de la siguiente manera:

$$AB = (0.7854) * D^2 \quad \text{Ecuación 1.}$$

donde:

$AB$ : área basal ( $m^2$ )

$D$ : diámetro de ambos extremos (m) (Arteaga & Castelán, 2008)

Para el volumen ( $V$ ), a partir de la cubicación de los árboles derribados, se tomó como referencia el método de Smalian (Cancino, 2006), además de la siguiente Ecuación:

$$V = A_b + A_s / 2L \quad \text{Ecuación 2.}$$

donde:

$V$ : volumen de la troza ( $m^3$ )

$A_b$ : diámetro basal mayor (m)

$A_s$ : diámetro menor (m)

$L$ : longitud donde  $L = L2 - L1$  (m)

### **Biomasa del fuste**

Se tomaron 20 árboles ( $n = 20$ ) de *G. arborea* como referencia antes de ser derribados. Dicho componente se estimó con base en la Ecuación (3), propuesta por Ruiz-Blandon et al. (2020):

$$Bsf = 10.8605 * DN (cm) - 2.56108 * h \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

$Bsf$ : biomasa del fuste (kg)

$DN$ : diámetro normal (cm)

$h$ : altura total

Una vez realizado el muestreo de la biomasa de *G. arborea* en ambos rodales, se cortaron 10 árboles ( $n = 10$ ) al azar con  $DN$  de 30 cm en promedio, se cortaron las trozas de 2 m a partir de la sección media del  $DN$ , y se

realizó un esquema de cruz a fin de direccionar los cortes de las trozas en sus diferentes planos (radial, transversal y tangencial) (Rodríguez et al., 2014). Lo anterior fue determinante para calcular las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *G. arborea* en el laboratorio.

## Muestreo edáfico

En cada rodal se tomaron tres ( $n = 3$ ) muestras de suelo (1 kg por muestra), distribuidas aleatoriamente en zigzag a 10 m de distancia entre hoyos y a 20 cm de profundidad (González-Molina et al., 2008), en aras de determinar sus propiedades físicas y químicas en el laboratorio.

## Análisis físicos y químicos edáficos

Estos análisis fueron realizados con base en los métodos descritos por la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). A partir del tratamiento de las muestras (secado, molido y tamizado en malla 60), se determinó la textura (hidrómetro de Bouyoucos), la densidad aparente ( $D_a$ , método del terrón), el pH en agua según la relación 1:2 (potenciómetro Orion Star A210, Thermo Fisher Scientific), la capacidad de intercambio catiónico (CIC, en  $C_2H_7NO_2$ ) y la conductividad eléctrica (CE) por conductimetría.

La concentración de C y N se cuantificó por el método de combustión a 900 °C, para lo cual se empleó el microanalizador CHSN-O Leco TruSpec Micro (LECO Corporation). La relación C:N se calculó tal como lo indica la expresión, y la MO se determinó convirtiendo C % en MO % a razón del factor de conversión 1.298.

## Propiedades físicas de la madera de *G. arborea*

### Densidad básica de la madera

Con un vernier digital Gocheer, se midieron 10 probetas de 20 x 20 x 20 mm ( $n = 10$ ) (DIN 52 182, 2000), que posteriormente fueron acondicionadas en el laboratorio (19.8 °C y 64 % de humedad) y pesadas con una balanza Gibertini Europe 600 (exactitud de 0.01 g). Una vez obtenido el peso seco, las muestras fueron sumergidas en agua dentro de un vaso de precipitado, de donde se tomó el volumen inicial del agua y el desplazado por la probeta. También se tomó el peso húmedo, lo que permitió estimar el volumen. La Ecuación (4) fue utilizada para calcular la densidad:

$$D = P/V \quad \text{Ecuación 4.}$$

donde:

$D$ : densidad de la madera ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$P$ : peso de la probeta (g)

$V$ : volumen de la probeta ( $cm^3$ )

## Propiedades mecánicas

Para calcular estas propiedades, se utilizó una máquina universal tipo R4-10 (Shimadzu Seisakusho LTD) con 25 T, de acuerdo con las normas DIN. Este proceso se describe a continuación.

### **Flexión estática (MOR-flexión)**

Con un vernier digital Gocheer, se midieron 10 probetas de 20 x 20 x 360 mm según la norma [DIN 52 186 \(2000\)](#). Las probetas fueron montadas entre dos soportes a 30 cm del punto central. Se aplicaron fuerzas constantes en el centro y la cara tangencial de los anillos de crecimiento a una velocidad de 30 a 60 s. La Ecuación (5) se empleó para calcular esta propiedad:

$$MOR_f = F * L_s * 6/4 * b * h^2 \quad \text{Ecuación 5.}$$

donde:

*MOR<sub>f</sub>*: resistencia a la flexión (N.mm<sup>-2</sup>)

*L<sub>s</sub>*: distancia entre soportes (mm)

*b*: ancho de la probeta en la cara radial (mm)

*h*: altura de la probeta en la cara tangencial (mm)

El módulo de elasticidad (*MOE*) se calculó de la siguiente manera:

$$MOE_{flexión} = \frac{1}{4} * (L_s^3 s) / b * h^3 = \Delta F / \Delta d \quad \text{Ecuación 6.}$$

donde:

*MOE<sub>flexión</sub>*: módulo de elasticidad a la flexión (N.mm<sup>-2</sup>)

*L<sub>s</sub>*: distancia entre los soportes (mm)

*b*: ancho de la probeta en la cara radial (mm)

*h*: altura de la probeta en la cara tangencial (mm)

$\Delta F$ : diferencia de la fuerza en el campo elástico ( $F_2 - F_1$ )

$\Delta d$ : diferencia de deformación ( $d_2 - d_1$ ).

$\Delta F$  y  $\Delta d$  se obtuvieron del diagrama de esfuerzos generados en la máquina para ensayos mecánicos.

### **Compresión longitudinal (MOR-comp)**

Con base en las normas [DIN 52 185 \(2000\)](#), 10 probetas de 20 x 20 x 60 mm fueron sometidas a una fuerza en la dirección longitudinal a sus fibras. Estas fuerzas se aplicaron ininterrumpidamente entre 30 y 60 s de velocidad hasta ocasionar la ruptura de las probetas. Las deformaciones fueron medidas con un extensómetro, el cual se colocó en los centros de los lados radiales en las probetas, con espaciamentos de 40 mm. Los ensayos mecánicos registraron las fuerzas máximas de rupturas, y los gráficos de esfuerzos y deformaciones fueron oportunos para calcular esta propiedad, lo cual se hizo mediante la siguiente Ecuación:

$$MOR_{comp} = F/a * b = F/A \quad \text{Ecuación 7.}$$

donde:

*MOR<sub>comp</sub>*: resistencia a la compresión (N.mm<sup>-2</sup>)

*F*: fuerza máxima de ruptura (kg)

*a*: lado (mm)

*b*: lado (mm)

*A*: área de la sección transversal (mm<sup>2</sup>)

### **Ruptura por impacto (W)**

De acuerdo con los lineamientos descritos en la [DIN 52 189 \(2000\)](#), probetas de 20 x 20 x 200 mm fueron sometidas a fuerzas dinámicas dirigidas al centro. Estas fuerzas se aplicaron con ayuda de un péndulo sobre el eje tangencial de las probetas (entre 150 y 300 J). Esta propiedad fue calculada de la siguiente manera:

$$W = w/a * b * 1000 \quad \text{Ecuación 8.}$$

donde

*W*: ruptura por impacto (kJ.m<sup>-2</sup>)

*w*: trabajo (J)

*a*: cara radial (mm)

*b*: cara tangencial (mm)

## Dureza de Janka

Aplicando los lineamientos de las normas [ISO/FDIS 13061-12 \(2017\)](#), 10 probetas de 50 x 50 x 50 mm fueron sometidas a cargas en los ejes radiales, tangenciales y longitudinales a velocidades de 5 mm.min<sup>-1</sup> hasta penetrar 5.64 mm de una esfera de 1 cm<sup>2</sup>. Los datos de la cargas se tomaron de la máquina de ensayos utilizada en este experimento.

## Análisis de datos

Las diferencias de crecimiento, productividad y propiedades físicas y mecánicas de la madera en *G. arborea* en los rodales evaluados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias Tukey ([Onyekwelu et al., 2006](#)). Las normalidades de los datos se verificaron mediante *P-P Plots*, los cuales fueron normales ([Ruiz-Blandon et al., 2020](#)). Las diferencias estadísticas entre las medias y sus respectivas variables en el RP y el RM por componente (árboles y suelo) se establecieron con  $p \leq 0.05$ , empleando el paquete estadístico SAS v9.4 ([SAS Institute, 2013](#)).

## RESULTADOS

### Análisis dasométrico y biomasa del fuste en rodales puros y mezclados de *G. arborea*

Las características estructurales de *G. arborea* en el RP y el RM estuvieron determinadas por su manejo, lo cual condicionó el crecimiento de la especie en ambos sistemas ([Tabla 1](#)). Aunque la preparación de los sitios y el marco de siembra fueron similares, la densidad final de árboles por superficie fue distinta ( $p=0.0001$ ). *G. arborea*, al crecer en el RM, presentó un aumento considerable del DN (más del 7.3 %,  $p = 0.03$ ) en comparación con el RP, donde mostró mayor *h* total (alrededor del 6.8 %,  $p=0.04$ ). El AB (16.6 %,  $p=0.001$ ) y el V (35 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>,  $p=0.03$ ) por superficie de ambos rodales fueron superiores en el RM ([Tabla 1](#)).

Según reportan las características dasométricas evaluadas, *G. arborea* es la especie dominante en el RM, seguida de *C. alliodora* y *P. guachapele* ( $p=0.001$ , [Tabla 1](#)).

En cuanto a la biomasa del fuste de *G. arborea* en el RP y el RM, la producción promedio por árbol fue ligeramente superior en el último (5.1 %,  $p=0.13$ , [Figura 2a](#)), lo cual es compatible con la diferenciación de diámetros entre las especies, como se indicó en la sección anterior. Sin embargo, la *G. arborea* del RP superó dicha producción a nivel de superficie (23.4 %,  $p=0.007$ , [Figura 2b](#)) debido al efecto de la densidad de árboles por área en ambos sistemas.

### Edafología de los rodales

En la [Tabla 2](#) se muestran las propiedades físicas y químicas de los suelos. La textura en ambos rodales es franco-arcillosa, con Da alrededor de 1.0 g.cm<sup>-3</sup>, típica en suelos de origen mineral ( $p=0.15$ ). El pH se mostró entre ligero y moderadamente ácido, con el RM favorecido en mayor medida ( $p=0.02$ ). La CIC fue muy alta en

los suelos de ambos rodales, si bien con valores similares ( $p=0.11$ ), al igual que la CE ( $p=0.7$ ), pues los rodales están ubicados contiguamente.

La concentración de C fue mayor en los suelos del RM ( $p=0.03$ ) y similar en N ( $p=0.19$ , [Tabla 2](#)), aunque su concentración fue baja para ambos casos. La relación C:N fue favorable, además de muy alta en los suelos del RM ( $p=0.0002$ ), al igual que los contenidos de MO ( $p=0.005$ , [Tabla 2](#)).

**Tabla 1.** Evaluación dasométrica de los rodales puros (RP) y mezclados (RM) de 18 años en el estado de Nayarit, México ( $n = 20$ )

Rodal	Densidad inicial (árboles.ha <sup>-1</sup> )	Densidad final (árboles.ha <sup>-1</sup> )	<i>h</i> (m.árbol <sup>-1</sup> )	DN (cm.árbol <sup>-1</sup> )	AB (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )
RP	1111a ± 1.1	232a ± 0.6	29.1a ± 1.7	34.2b ± 7.2	21.3a ± 0.9	465.1a ± 29.9
Total	1111A ± 1.1	232B ± 0.6	29.1A ± 1.7	34.2A ± 1.2	21.3B ± 0.9	465.1B ± 29.9
RM						
G. arborea	300d ± 1.0	130d ± 1.9	25.4b ± 0.3	39.6a ± 1.3	16.1b ± 3.1	305.0b ± 22.4
C. alliodora	356c ± 12.1	152c ± 9.0	20.6c ± 1.9	20.8c ± 0.6	5.1c ± 1.7	79.8d ± 9.5
P. guachapele	455b ± 11.3	200b ± 10.3	18.1c ± 6.1	23.4c ± 0.1	8.6c ± 1.3	116.8c ± 17.3
Total/promedio	1111A ± 55.7	482A ± 21.9	21.4B ± 3.5	27.9B ± 6.9	29.8A ± 5.5	501.6A ± 46.7

Los valores de medias (± error estándar) con letras en cada columna indican diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ).

Las medias con letras en mayúscula representan comparaciones entre totales.

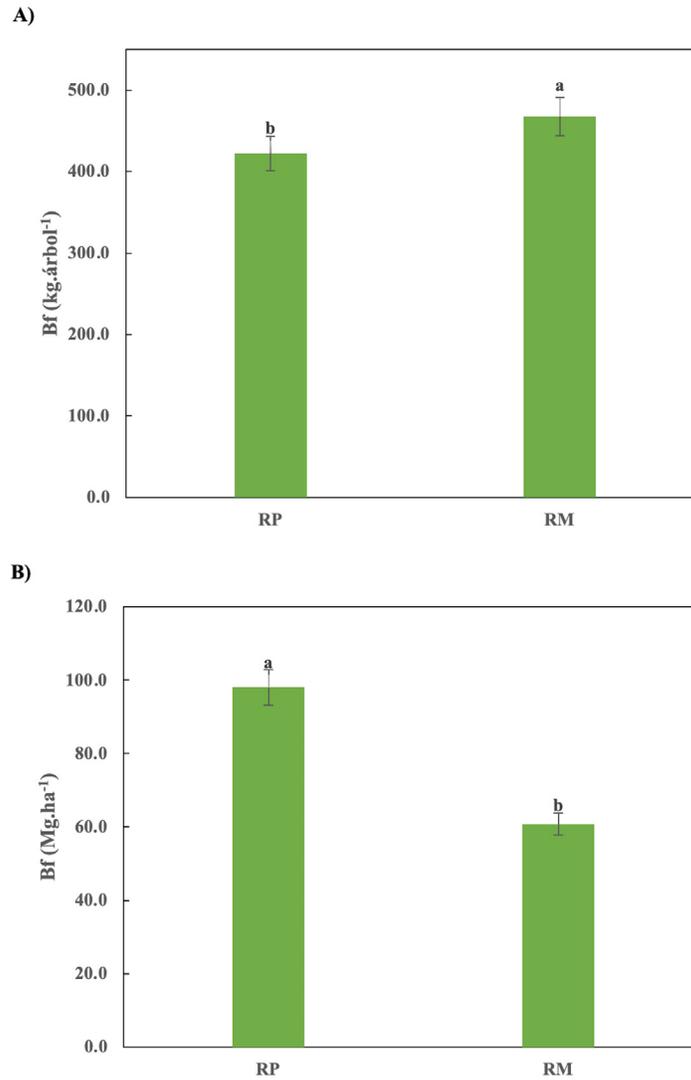
RP: rodal puro, RM: rodal mezclado, *h*: altura total, DN: diámetro normal, AB: área basal, V: volumen.

**Tabla 2.** Propiedades edáficas en rodales comerciales de *G. arborea* de 18 años en el estado de Nayarit, México ( $n = 3$ )

Propiedad	Rodal	
	RP	RM
Profundidad (cm)	0-20	0-20
Textura	Fr	Fr
Da (g.cm <sup>3</sup> )	1.0a ± 0.04	0.9a ± 0.06
pH	5.8b ± 0.4	6.5a ± 0.2
CIC (cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	40.5a ± 0.08	40.9a ± 0.05
CE (dS.m <sup>-1</sup> )	0.03a ± 0.002	0.03a ± 0.001
C (%)	1.9b ± 0.03	2.5a ± 0.03
N (%)	0.1a ± 0.002	0.1a ± 0.001
C:N	21.1b ± 0.03	31.3a ± 0.05
MO (%)	2.5b ± 0.01	3.3a ± 0.1

Los valores de medias (± error estándar) con letras distintas en cada fila son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ).

RP: rodal puro, RM: rodal mezclado, Fr: franco arcilloso, Da: densidad aparente, CIC: capacidad de intercambio catiónico, CE: conductividad eléctrica, C: carbono, N: nitrógeno, MO: materia orgánica.

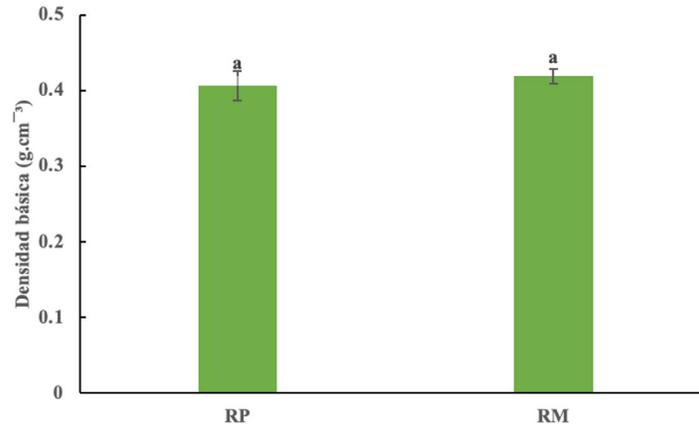


**Figura 2.** Biomasa del fuste en rodales comerciales de *G. arborea* de 18 años en el estado de Nayarit, México. a) Biomasa del fuste promedio árbol y b) biomasa del fuste por superficie. Los valores de medias ( $\pm$  error estándar) con diferentes letras en cada barra son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ );  $n = 20$ . Esta representación gráfica únicamente comparó la *G. arborea* del RP con la del RM.

## Propiedades físicas y mecánicas en la madera del RP y el RM

### Propiedades físicas

La densidad básica en la madera de *G. arborea* fue estadísticamente similar ( $p=0.64$ ) para ambos rodales (RP=0.40 g.cm<sup>-3</sup> y RM=0.42 g.cm<sup>-3</sup>), indicando madera de muy baja densidad (Figura 3).



**Figura 3.** Densidad básica de la madera de *G. arborea* establecida en rodales puros y mezclados a los 18 años de edad en el estado de Nayarit, México. Los valores de medias ( $\pm$  error estándar) con letras distintas en cada barra son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ );  $n = 10$ .

### Propiedades mecánicas

De acuerdo con los valores de flexión obtenidos en los ensayos mecánicos, el MOE, el MOR y la compresión (MOR) longitudinal fueron mayores en la madera de *G. arborea* del RP (3.8, 1.2 y 14.5 %;  $p = 0.68, 0.28$  y  $0.0001$ ), independientemente de la significancia estadística (Tabla 3).

Propiedades como la ruptura por impacto y la dureza de Janka en diferentes caras (8.1 y 1.5 %; 6.3 y 6.2 %;  $p = 0.28$  y  $0.80$ ;  $p = 0.50$  y  $0.21$ ) fueron estadísticamente similares en la madera de *G. arborea* de ambos rodales (Tabla 3).

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas de la madera de *G. arborea* proveniente de RP y RM de 18 años en el estado de Nayarit, México ( $n = 10$ )

Rodal	Flexión (N.mm <sup>-2</sup> )		Compresión Long (N.mm <sup>-2</sup> ) MOR	Impacto (kJ.m <sup>-2</sup> )	Dureza Janka (N.mm <sup>-2</sup> )		
	MOE	MOR			Long	Rad	Tang
RP	8245.5a $\pm$ 288.5	61.9a $\pm$ 2.7	36.9a $\pm$ 1.3	27.9b $\pm$ 1.3	30.4b $\pm$ 2.8	25.9a $\pm$ 2.5	20.4b $\pm$ 2.8
RM	8051.8a $\pm$ 408.8	57.4a $\pm$ 3.3	27.6b $\pm$ 0.9	32.9a $\pm$ 3.9	36.3a $\pm$ 1.7	26.6a $\pm$ 1.9	26.4a $\pm$ 2.9

Los valores de medias ( $\pm$  error estándar) con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ).

RP: rodal puro, RM: rodal mezclado, MOE: módulo de elasticidad, MOR: módulo de ruptura, Long: longitudinal, Rad: radial, Tang: tangencial.

## DISCUSIÓN

### Comportamiento dasométrico y biomasa fustal de *G. arborea* en rodales puros y mezclados

Los datos obtenidos en esta investigación mostraron evidencias relevantes respecto al comportamiento dasométrico de *G. arborea* en el RP y el RM, dado que este último es el más apropiado para el incremento en diámetro y biomasa de la especie. Por ende, los resultados contrastaron con lo calculado por [Onyekwelu et al. \(2006\)](#). En RP de Nigeria, *G. arborea* de similares edades alcanzaron una *h* total por árbol de 23 m y un DN de 31 cm; aunque, en cuanto a productividad, se consideró el AB ( $67.8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) y el V por superficie ( $859.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) ([Onyekwelu et al., 2006](#)) de estos rodales, que fueron superiores (alrededor de  $38 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  y  $357.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  respectivamente) a lo estimado en el RM debido al efecto de la densidad de árboles por área. No obstante, según [Espinoza-Durán y Moya \(2013\)](#), en RP ubicados en diferentes pendientes de Costa Rica, *G. arborea* alcanzó una *h* de 14.9 m, un DN de alrededor de 31.2 cm y un V por área de  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . En México, tanto [Martínez-Zurimendi et al. \(2015\)](#) como la [CONAFOR \(2013\)](#) indicaron que *G. arborea* suele ganar entre 14 y 20 cm de DN y  $270\text{-}970 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  en V según la edad, el manejo y las condiciones del sitio. Un manejo oportuno de los rodales (mínimo dos cortas entre los 7 y 20 años) y las características de los sitios favorece el aumento en la productividad de *G. arborea*. Por ende, bajas densidades de plantación y suelos idóneos suponen un mayor desarrollo volumétrico en relación con la edad ([Moya et al., 2008](#); [Arias et al., 2011](#); [Telles et al., 2021](#)).

### Análisis de la biomasa en *G. arborea*

La producción de biomasa en el fuste fue mayor en *G. arborea* del RM por árbol. Por superficie, la diferenciación de densidades de plantación condicionó el rendimiento del RP. Se partió de la base de que el fuste representa entre 60 y 65 % de la biomasa total del árbol ([Goussanou et al., 2018](#); [Fonseca et al., 2021](#)). Para este estudio, se tomó como base el 63 %. En rodales de Nigeria, [Onyekwelu et al. \(2006\)](#) reportaron  $267.2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$  en edades similares, y Redondo-Brenes y Montagnini (2006) señalaron que altas densidades de plantación afectan drásticamente el rendimiento de biomasa en la especie.

### Propiedades de los suelos

Los valores del componente edáfico en el RP y el RM coincidieron con lo reportado por [Onyekwelu et al. \(2006\)](#) y [Adekunle et al. \(2011\)](#). En Nigeria y Costa Rica, la especie se desarrolló mejor en suelos de textura franco-arcillosa, pH entre ácido y neutro (5-7) y Da alrededor de  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  a 30 cm de profundidad y altitudes inferiores a los 300 m. Cuando *G. arborea* tiende a crecer con defectos físicos (bajo porte, fustes bifurcados, exceso de ramificaciones y problemas fitosanitarios) es porque el pH del suelo es menor a 5 y la Da superior a  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , en presencia de suelos muy húmedos, mal drenados y bajos en fertilidad ([Rojas et al., 2004](#); [Walter et al., 2016](#)). Los contenidos de MO del RM fueron mayores a los del RP, de lo cual se concluye que los suelos con baja Da y bien conservados facilitan directamente la presencia de MO, indispensable para el crecimiento de los árboles ([Almeida et al., 2010](#)), si bien los datos de esta investigación sugirieron que los contenidos de MO hallados eran de calidad media ([SEMARNAT, 2002](#)).

Aunque el N % fue igual en los suelos de los rodales estudiados, se observó una diferencia en la relación C:N, que fue altamente superior en el RM. los valores altos de crecimiento, rendimiento volumétrico y biomasa de *G. arborea* correspondieron al suelo, con C:N  $\geq 30$ , si bien este efecto es producido por *P. guachapele*, una especie considerada como fijadora de N (Zuluaga & Castro, 2018; Rojas *et al.*, 2021). El N es directamente responsable del crecimiento en los árboles. Para Rojas *et al.* (2004), si se incorpora el N de manera natural o sintética, acelera el crecimiento de *G. arborea*. No obstante, C:N  $\geq 11$  indica la existencia en exceso de C, lo cual, en algunos casos, inmoviliza el N, limitando su absorción por parte de las plantas, aunque esto depende de diversos eventos bioquímicos en el suelo (Gamarra *et al.* 2018). En esta investigación ocurrió lo contrario, pues las relaciones C:N fueron mucho más altas. Por consiguiente, dicha variable indicó una cantidad suficiente del nutriente en los suelos analizados, además de su disponibilidad para los árboles. Ladrach (2004) y Moya *et al.* (2008) señalan que la combinación de *T. grandis* y *Swietenia macrophylla* (especies de crecimiento más lento) con *G. arborea* en similares condiciones de sitio mejora sus rendimientos volumétricos.

### Tecnología en la madera de *G. arborea*

Esta investigación señaló que algunas propiedades de la madera de *G. arborea* varían ligeramente según el tipo de rodal. No obstante, los valores de densidad básica obtenidos fueron similares en ambos rodales y también son comparables a lo expresado por Moya y Leandro (2010), Méndez (2015) y Méndez-Mejías y Moya (2018), quienes reportaron valores entre 0.43 y 0.48 g.cm<sup>-3</sup> en rodales de distintas edades en zonas de temperatura similar (promedio anual: 25 °C) pero de mayor precipitación (promedio anual: 3247 mm promedio anual) respecto al presente estudio. Al respecto, Rojas *et al.* (2004), Kokutse *et al.* (2004), Rodríguez *et al.* (2014), Salazar-Zeledón (2016) y Telles *et al.* (2021) expresaron que los factores asociados al ambiente donde se establecen los rodales, la edad y las altas densidades de plantación afectan el incremento en diámetro de los árboles, alterando su densidad. Esto explica las semejanzas en las maderas estudiadas.

Por su parte, los resultados de flexión (MOE y MOR) fueron similares entre las muestras de madera de *G. arborea* bajo estudio, aunque difieren según lo reportado por Arévalo y Londoño (2005) y Tewari (1995, citado por Jiménez, 2016) en Colombia y Ecuador en rodales de edades contiguas (MOE de 6884.26 a 7943.38 N.mm<sup>-2</sup> y MOR de 52.17 a 53.25 N.mm<sup>-2</sup>). Silva *et al.* (2010) afirmaron que, en madera de *G. arborea* establecida en México, se han alcanzado MOE entre 7000 y 10 500 N.mm<sup>-2</sup> y MOR cercanos a 77 N.mm<sup>-2</sup> en rodales de origen comercial. Shmulsky y Jones (2011) señalaron que la densidad de la madera es un indicador de la elasticidad y rigidez; cuanto mayor sea esta, también incrementa el MOE. Lo anterior explica las similitudes encontradas en las maderas del presente estudio.

La compresión longitudinal (MOR) fue superior en la madera del RP, y la resistencia al impacto fue mayor en la madera del RM, comparable a lo expresado por Arévalo y Londoño (2005) y Gonzáles (2003, citado por Gonzáles & Serrano, 2012) en Colombia y Costa Rica (MOR entre 27.94 y 29.22 N.mm<sup>-2</sup>) y por Silva *et al.* (2010) y Tewari (1995, citado por Jiménez, 2016) en México y Ecuador (43 y 49 kJ.m<sup>-2</sup>). A partir de esto, se demuestra que la mayor altura de los árboles contribuye al fortalecimiento de sus fibras, lo que mejora la compresión. A su vez, los diámetros de mayor tamaño implican una madera de mejor resistencia. Todo lo anterior, en relación con la edad y manejo de los rodales.

Aunque la dureza de las caras de las maderas (radial, tangencial y longitudinal) no fue estadísticamente diferente, sí se observó un comportamiento conforme a lo expuesto por [Moya y Leandro \(2010\)](#) y [Silva et al. \(2010\)](#) en Costa Rica y México (radial = 25 y 26.57 N.mm<sup>-2</sup>, tangencial = 26.99 y 28.7 N.mm<sup>-2</sup> y longitudinal = 27.94 y 29.33 N.mm<sup>-2</sup>). Al respecto, se identificaron diferencias en las propiedades analizadas en comparación con otros estudios sobre el crecimiento de *G. arborea*. Los hallazgos son soportados por diferentes reportes de *Tectona grandis* y *Eucalyptus camaldulensis*, que son especies con un ritmo de crecimiento similar ([Rodríguez et al., 2014](#); [Nogueira et al., 2018](#)).

## CONCLUSIONES

Con base en las condiciones del sitio y las propiedades del suelo del área de estudio, se deduce que la densidad de plantación en el RM contribuye a la productividad respecto a los parámetros dasométricos evaluados. Sin embargo, la densidad de *G. arborea* por superficie tuvo mayor impacto en la biomasa en RP. Además de lo anterior, los rodales donde se mezcla *G. arborea* con especies de diferentes ritmos de crecimiento favorecen el incremento en diámetro de la especie, a la vez que mejoran la calidad de la madera en términos de ciertas propiedades físicas y mecánicas. Además, los rodales mezclados tienden a ser más importantes que los puros, pues producen mayor diversidad de maderas y mejoran algunas de sus propiedades, además de su volumen y biomasa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al propietario de la empresa Agroforestal Nayarita S.A, el Lic. Álvaro Navarro Esquivel (QEPD) y colaboradores; al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por financiar los estudios de posgrado y posdoctorado al autor de correspondencia; a la Universidad Politécnica de Madrid (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Grupo de Investigación de Construcción con Madera, UD de Industrias de los Productos Forestales), representada por el Dr. Ignacio Bobadilla Maldonado, por permitir la realización de las pruebas físicas y mecánicas de la madera; y a Loren Z. Guzmán López, Marilyn Z. Ruiz Guzmán y Lovren A. Ruiz Guzmán (QEPD) por ser parte indirecta del presente estudio.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

E.H.Á. y B.A.R.B. planificaron el proyecto, además de realizar el trabajo de campo y laboratorio. M.G.C y G. Q.B. realizaron el análisis estadístico de los datos. Todos los autores participaron en interpretación de datos y en la construcción, la redacción y la corrección del borrador del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Adekunle, V. A. J., Alo, A. A., & Adekayode, F. O. (2011).** Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian rainforest ecosystem. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 10(2), 127-135.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2011.05.001>
- Almeida, E., Júnior, J., & Finger, Z. (2010).** Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* L.F.) em diferentes idades. *Ciência Florestal*, 20(4), 559-568.  
<http://dx.doi.org/10.5902/198050982414>
- Arévalo, F. R. L., & Londoño, A. A. (2005).** *Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima*. Editorial Universidad del Tolima.
- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., Richter, D. B., & Dohrenbusch, A. (2011).** Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 1779-1788.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.009>
- Arteaga, M. B., & Castelán, L. M. (2008).** Evaluación dasométrica temprana de una plantación agroforestal de tres especies introducidas, en el municipio de Huehuetla, Hidalgo. *Revista Chapingo Serie ciencias forestales y del ambiente*, 14(2), 105-111.
- Cancino, J. (2006).** *Dendrometría básica. Proyecto de desarrollo de la docencia*. Editorial Universidad de Concepción.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2000).** *Gmelina arborea Roxb. SIRE: CONABIO-SEMARNAT. Paquetes tecnológicos*. Editorial Comisión Nacional Forestal.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2012).** *Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales, a 15 años de su creación*. Editorial Comisión Nacional Forestal.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2013).** *Evaluación de la situación actual de proyectos de plantaciones forestales comerciales finiquitados*. Editorial Comisión Nacional Forestal.
- Dhakulkar, S., Ganapathi, T. R., Bhargava, S., & Bapat, V. A. (2005).** Induction of hairy roots in *Gmelina arborea* Roxb. and production of verbascoside in hairy roots. *Plant Science*, 169(5), 812-818.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.05.014>
- DIN 52 182 (2000).** *Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte. DIN Taschenbuch 31. Normen über Holz*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 52 185 (2000).** *Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. DIN Taschenbuch 31. Normen über Holz*. Beuth Verlag GmbH.

**DIN 52 186 (2000).** *Prüfung von Holz; Biegeversuch. DIN Taschenbuch 31. Normen über Holz.* Beuth Verlag GmbH.

**DIN 52 189 (2000).** *Prüfung von Holz; Schlagbiegeversuch; Bestimmung der Bruchschlagarbeit. DIN Taschenbuch 31. Normen über Holz.* Beuth Verlag GmbH.

**Espinoza-Durán, J., & Moya, R. (2013).** Aprovechamiento e industrialización de dos plantaciones de *Gmelina arborea* de 15 años de edad en diferentes condiciones de pendiente. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 237-248.

<http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.067>

**Fonseca, W., Cruz, R. M., Arias, C. Á., Rojas, M., & Parallada, M. S. (2021).** Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 143-159.

<https://doi.org/10.15359/rca.55-1.7>

**Forrester, D. I., Pares, A., O'hara, C., Khanna P. K., & Bauhus, J. (2013).** Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of Eucalyptus and nitrogen-fixing Acacia. *Ecosystems*, 16(1), 123-132.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10021-012-9600-9>

**Gamarra, L. C., Lezcano, M. I., De Ortiz, M. V., Galeano, M. D., & Cardús, A. J. (2018).** Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4-26.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>

**García, E. (1987).** *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (4a ed.). Editorial Offset Larios.

**Germplasm Resources Information Network (GRIN) (2023a).** *National plant germplasm system: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: Gmelina arborea Roxb.*

<https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?id=17827>

**Germplasm Resources Information Network (GRIN) (2023b).** *National plant germplasm system: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken.*

<https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?11470>

**Germplasm Resources Information Network (GRIN) (2023c).** *National plant germplasm system: Taxonomy for plants resources. Information network. Taxon: Pseudosamanea guachapele (Kunth) Harms.*

<https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?id=405172>

**González, G., & Serrano, J. R. (2012).** Propiedades y utilidades de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(1), 61-69.

<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/598>

**González-Molina, L., Etchevers-Barra, J. D., & Hidalgo-Moreno, C. (2008).** Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751.

- Goussanou, C. A., Guendehou, S., Assogbadjo, A. E., & Sinsin, B. (2018).** Application of site-specific biomass models to quantify spatial distribution of stocks and historical emissions from deforestation in a tropical forest ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 29(1), 205-213.  
<https://doi.org/10.1007/s11676-017-0411-x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017).** *Anuario estadístico y geográfico de Nayarit, México*. Editorial Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ISO/FDIS 13061-12 (2017).** *Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 12: Determination of static hardness*. Editorial International Organization for Standardization.
- Jiménez, P. L. P. (2016).** *El cultivo de la Melina (Gmelina arborea Roxb.) en el trópico*. Editorial Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Kokutse, A. D., Baillères, H., Stokes, A., & Kokou, K. (2004).** Proportion and quality of heartwood in Togelese teak (*Tectona grandis* L. f.). *Forest Ecology and Management*, 189, 37-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.041>
- Ladrach, W. E. (2004).** Harvesting and comparative thinning alternatives in *Gmelina arborea* plantations. *New Forests*, 28(2-3), 255-268.  
<https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040952.31476.03>
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L. M., de la Cruz-Arias, V., & Álvarez-Martínez, J. (2015).** Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México (Ensayo). *Revista Fitotécnica Mexicana*, 38, 415-425.  
<https://doi.org/10.35196/rfm.2015.4.415>
- Méndez-Mejías, L. D., & Moya, R. (2018).** Effect of thermo-treatment on the physical and mechanical, color, fungal durability of wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from forest plantations. *Materials Science*, 24(1), 59-68.  
<https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.1.17545>
- Méndez, L. (2015).** Determinación del módulo de elasticidad por los métodos dinámico y estático para madera termo-tratada de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13, 43-50.  
<https://doi.org/10.18845/rfmk.v13i30.2459>
- Moya, R. (2001).** Estudio de las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de melina (*Gmelina arborea*) creciendo en Costa Rica. Desde el Bosque. Órgano informativo oficial de la Cámara. *Costarricense Forestal*, 3(9), 22-27.
- Moya, R., & Leandro, L. (2010).** Tecnología de madera de plantaciones. Melina. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5, 87-101.

- Moya, R., Araya, L. & Vilchez, B. (2008).** Variation in the pith parameter of *Gmelina arborea* trees from fast growth plantations in Costa Rica. *Annals of Forest Science*, 65(6), 612-612.  
<https://doi.org/10.1051/forest:2008045>
- Nogueira, C. J. A., De Araujo, V. A., Vasconcelos, J. S., Gutiérrez-Aguilar, C. M., Cruz, J. N., Vasconcelos, J. C., Fábio, A., Christoforo, L., & Lahr, F. A. (2018).** Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para uso estructural proveniente de Restinga, Brasil. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 52-62.  
<https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1155>
- Onyekwelu, J. C. (2004).** Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 26(1), 39-46.  
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00100-4)
- Onyekwelu, J. C., Mosandl, R., & Stimm, B. (2006).** Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 214-227.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.002>
- Redondo-Brenes, A., & Montagnini, F. (2006).** Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 232(1-3), 168-178.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.067>
- Rodríguez, R., Zamora, J. F., Silva, J. A., Salcedo, E., & Fuentes, F. J. (2014).** Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 12-25.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i24.316>
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., & Arguedas, M. (2004).** *Manual para productores de melina (Gmelina arborea) en Costa Rica: Botánica y ecología*. Costa Rica.
- Rojas, J., Ortiz, A. A., López, D. F., Rojas, A. R., & Erazo, E. B. (2021).** Caracterización y diversidad de árboles dispersos en pasturas de un paisaje de bosque seco tropical en el Caribe Colombiano. *Livestock Research for Rural Development*, 33(7), 1-12.  
<https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd33/7/3393jaria.html>
- Romo-Lozano, J. L., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Ávila Angulo, M. L. (2017).** Estimación del valor financiero de las existencias maderables de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México. *Madera y Bosques*, 23(1), 111-120.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2017.231473>
- Ruiz-Blandon, B. A., Hernández-Álvarez, E., Rodríguez-Macías, R., & Salcedo-Pérez, E. (2020).** Valoración dasométrica y producción de biomasa en *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. establecida en plantaciones puras y mixtas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 94-117.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.644>

**Salazar-Zeledón, E. (2016).** Influencia de altas densidades de plantación en el poder calorífico y propiedades físicas de la madera para la especie *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(30), 51-56.  
<https://doi.org/10.18845/rfmk.v13i30.2460>

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2023).** *Programa anual de trabajo 2023*. Editorial Comisión Nacional Forestal.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002).** *Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Editorial Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**Shmulsky, R., & Jones, P. D. (2011).** *Forest products and wood science: An Introduction* (6a ed.). John Wiley & Sons.  
<https://doi.org/10.1002/9780470960035>

**Silva, J. A., Fuentes, F. J., Rodríguez, R., Torres, P. A., Lomelí, M. G. R., Ramos, Q. J., Waitkus, C., & Richter, H. G. (2010).** *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México. Editorial Universidad de Guadalajara.

**Soil Taxonomy (2014).** *Keys to soils taxonomy* (12a ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Services.

**Statistical Analysis System (SAS) (2013).** *SAS version 9.4*.  
[https://www.sas.com/es\\_mx/home.html](https://www.sas.com/es_mx/home.html)

**Telles, A. R., Alanís, R. E., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J., & de los Santos, P. H. M. (2021).** Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb, en Tlatlaya, Estado de México. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-19.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711987>

**Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B., & Freibauer, A. (2016).** Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A systematic method comparison. *Soil Science Society of America Journal*, 80(3), 579-591.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0407>

**Zuluaga, L., & Castro, E. (2018).** Valoración de servicios ambientales por captura de CO<sub>2</sub> en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Revista Luna Azul*, 47, 01-20.  
<https://doi.org/10.17151/luaz.2018.47.1>

