

Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos

Response of clones of *Gmelina arborea* Roxb. (melina) in acidic soil conditions

William Hernández Castro¹, Yorleny Badilla Valverde², Edwin Esquivel Segura³, Olman Murillo Gamboa⁴

[Recibido: 26 de abril 2020, Aceptado: 7 de enero 2021, Corregido: 07 de marzo 2021, Publicado: 1 de julio 2021]

Resumen

[**Introducción**]: *Gmelina arborea* se ha consolidado como la segunda especie más utilizada en la reforestación comercial en Costa Rica. [**Objetivo**]: Evaluar el comportamiento de clones *G. arborea* en condiciones de suelo ácidos. [**Metodología**]: Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con 6 repeticiones, 29 clones y 5 testigos, con un distanciamiento de 4 x 4 m. Se realizó un análisis del suelo y se calcularon parámetros genéticos a diferentes edades, para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura y volumen comercial, utilizando el software SELEGEN, el cual se basa en el método REML/BLUP; asimismo, se realizaron correlaciones genéticas entre las variables evaluadas. [**Resultados**]: El análisis del suelo reflejó deficiencias nutricionales de elementos esenciales para el desarrollo de la melina, un pH menor a 5.5, altos contenidos de hierro (Fe) y saturación de aluminio (Al) elevado. Los mayores coeficientes de heredabilidad individual y media del clon se presentaron a la edad de 4.5 años, donde el DAP es el carácter que presentó mayores valores. Las mayores correlaciones genéticas se presentaron entre las variables DAP-volumen comercial a partir de los 3.5 años. Se evidenció que existen 10 clones que mejor se adaptaron a las condiciones del sitio, presentando mayores crecimientos en las variables dasométricas, con ganancias genéticas dentro del rango de 12.7 % y 28 %, comparadas con la media general del ensayo y el material utilizado como testigo. [**Conclusiones**]: Se concluye que existe material genético de melina con potencial para adaptarse a condiciones de suelo ácidos.

Palabras clave: ganancia genética; mejoramiento genético; parámetros genéticos; pH del suelo.

Abstract

[**Introduction**]: *Gmelina arborea* has become the second most used species in commercial reforestation in Costa Rica. [**Objective**]: To evaluate the behavior of *G. arborea* clones in acidic soil conditions. [**Methodology**]: A randomized complete block experimental design was used, with 6 replications, 29 clones and 5 controls, with a distance of 4 x 4 m. A soil analysis was performed, and genetic parameters were calculated at different ages, for the variables diameter at breast height (DBH), height and commercial volume, using the SELEGEN software, which is based on the REML/BLUP method, and genetic correlations were made between the evaluated variables. [**Results**]: Soil analysis showed nutritional deficiencies of essential elements for the development of melina, a pH lower than

- 1 Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica; william.hernandez.castro@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0003-2416-8329>
- 2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica; yorlenybadilla@yahoo.es; <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>
- 3 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica; eesquivel@itcr.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0001-9553-060X>
- 4 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica; olmuga@yahoo.es; <https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>



5.5, high iron (Fe) contents and high aluminum (Al) saturation. The highest individual and mean heritability coefficients of the clone were obtained at the age of 4.5 years, where DBH presented the highest values. The highest genetic correlations were found between the DBH and commercial volume variables from 3.5 years onwards. Ten clones showed the best adaptation to the site conditions, presenting the highest values in dasometric variables, with genetic gains in the range of 12.7 % and 28 %, compared to the general mean of the test and the material used as control. [Conclusions]: There is genetic material of melina with potential to adapt to acidic soil conditions.

Keywords: genetic gain; genetic improvement; genetic parameters; soil pH.

1. Introducción

La *Gmelina arborea* (melina) es una especie que ha sido utilizada para la reforestación comercial, desde hace varias décadas en Costa Rica, prácticamente desde que se inició el desarrollo del sector forestal del país. No obstante, el éxito con el manejo silvicultural se obtuvo a principios de la década de 1990, con el establecimiento de proyectos de reforestación a mayor escala, coincidiendo con los primeros programas de mejoramiento genético de la especie (Badilla y Murillo, 2011; Murillo, 1992; Zeaser, 1998).

Las primeras plantaciones estaban orientadas a producir materia prima para la industria papelera y para la producción de leña. Sin embargo, esta situación fue cambiando con la implementación de nuevos usos de la madera, aunado a una transformación de la industria primaria para la producción de madera para aserrío, la cual, posteriormente, se utilizó en el sector construcción, mueblería y producción de postes rollizos preservados (Moya, 2004). Lo anterior permitió que cada vez más se establecieran proyectos de reforestación a mayor escala, hecho que impulsó a la vez el establecimiento de programas de mejoramiento genético con la especie que permitieron obtener mayores rendimientos, a un menor costo y en un menor tiempo.

La especie se desarrolla sobre todo en suelos profundos, húmedos, bien drenados y con un buen suministro de nutrientes, pero se puede desarrollar en suelos desde ácidos o calcáreos, hasta lateríticos. En los suelos arcillosos, pesados o con mal drenaje, no se desarrolla satisfactoriamente (Murillo y Valerio, 1991). En cuanto a la topografía, los mejores sitios son los planos o de poca pendiente (Rojas *et al.*, 2004).

Por otra parte, Jiménez (2016) señala que los sitios óptimos para lograr un buen crecimiento de la especie son terrenos profundos de textura ligera y zonas bajas en donde existe acumulación de nutrientes. Reitera, a la vez, que esta especie no crece bien en suelos pobres, secos e inundados, es decir, no soporta suelos con factores limitantes extremos. En general, se recomienda que los contenidos de calcio y magnesio deben ser mayores de 6 miliequivalentes por cien mililitros de suelo en el primer horizonte y el pH se debe encontrar entre 5 y 6 de acidez (Jiménez, 2016).

Experiencias similares a las del presente estudio se han tenido en Ecuador, en zonas secas de la provincia del Guayas, donde se han establecido plantaciones con melina, con resultados no muy satisfactorios. Las características morfológicas de los árboles son: torcidos, hojas



pequeñas en menor intensidad, raíz superficial, tallos cortos, muy lignificados y no desarrollan, quedándose como arbustos (Jiménez, 2016).

El desarrollo de la silvicultura clonal en Costa Rica impulsó el establecimiento de plantaciones clonales de melina con fines comerciales, debido a la respuesta del material genético a un amplio rango de distribución, en diferentes zonas edafoclimáticas, que se traduce en mejores rendimientos y, por lo tanto, en un rápido retorno de la inversión.

Aunado a los requerimientos edáficos, el estudio de las diferentes accesiones dispuestos en ensayos genéticos en el campo permite conocer la variabilidad genética (Wee *et al.*, 2012), el comportamiento de los clones, su crecimiento, calidad y la ganancia genética (Balcorta y Vargas, 2004), los cuales constituyen insumos básicos para los programas de mejoramiento genético de la especie. Los análisis genéticos del material clonal, por medio de la estimación de parámetros genéticos, son herramientas útiles para predecir la ganancia genética que se espera del material clonal (Kumar *et al.*, 2010). La variación entre clones se usa comúnmente para realizar una estimación de la variación genética total, y para calcular el grado de control genético para un rasgo particular (Foster y Shaw, 1988).

Padua (2004) sugiere, como una opción práctica, la selección temprana para reducir los ciclos de mejoramiento y de ensayos; no obstante, esta decisión se debe basar en el conocimiento previo del comportamiento de los clones bajo una determinada condición edafoclimática que permita la selección del material genético adecuado. El presente estudio tiene como objetivo la evaluación de un ensayo genético de melina y la respuesta a condiciones edáficas con niveles de acidez limitante para el desarrollo de la especie.

2. Metodología

2.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se localizó en la zona sur de Costa Rica, específicamente en el cantón de Pérez Zeledón, ubicado en la provincia de San José. El ensayo clonal de *Gmelina arborea* (melina) se ubica en el poblado La Ceniza, en la finca La Ceniza, perteneciente a la Cooperativa CoopeAgri R.L., cuya ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 9°18'5.76" N y 83°41'43.78" O, a una altitud de 734 m s.n.m. La temperatura promedio anual oscila entre los 24-26 °C, la precipitación media anual es de 3 000-4 000 mm (Instituto Meteorológico Nacional, 2005) y una humedad relativa promedio de 80 % (Alfaro *et al.*, 2013). La región se localiza en la zona de vida Bosque muy Húmedo Premontano, con una altitud promedio de 700 m s.n.m. (Alfaro *et al.*, 2013).

2.2 Diseño experimental y material vegetal utilizado

El ensayo fue establecido en el mes de octubre del año 2013 y consistió en una plantación de material clonal de melina, compuesto por 29 accesiones y cinco testigos, uno proveniente del



Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH, T₁), otro del material genético de Ston Forestal (Ston, T₂), clones de la empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centro América S.A. (BARCA, T₃), Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR, T₄) y un último testigo proveniente del material genético utilizado en la zona norte (T₅) de Costa Rica. Las prácticas culturales aplicadas a la plantación consistieron en rodajea durante los primeros 6 meses de edad, posteriormente chapeas anuales, para favorecer a los árboles y evitar la competencia principalmente con especies de gramíneas presentes en el sitio.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, compuesto por 34 tratamientos (29 clones y 5 testigos), 6 repeticiones (bloques) y dentro de cada repetición existen 6 individuos por tratamiento, distribuidos aleatoriamente en tres parejas dentro de cada bloque, con la restricción de no quedar juntas las parejas de un mismo tratamiento dentro de un mismo bloque. El distanciamiento entre árboles fue de 4 m x 4 m, para una densidad total por hectárea de 625 árboles/ha. Los clones utilizados provienen de la Cooperativa Genética Forestal (GEN-FORES) y constituyen el material genético utilizado por las empresas en proyectos de reforestación comercial con melina en Costa Rica.

Se realizó un análisis fisicoquímico del suelo, donde se estableció el ensayo, se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 0 – 20 y de 20 – 40 cm, distribuidas de manera que fueran representativas de todo el sitio. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, donde fueron preparadas y analizadas. El procedimiento para medir el pH y CE en agua 10:25; Acidez, Al, Ca y Mg con KCl 1M 1:10; P, K, Zn, Fe, Mn y Cu con solución extractora Olsen Modificado pH 8.5 (NaHCO₃ 0.5 N, EDTA 0.01 M, Superfloc 127) 1:10; S con Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 0,008M 10:25. Acidez determinada por valoración con NaOH y Al con HCl; P y S por colorimetría con el analizador de inyección de flujo (FIA, por sus siglas en inglés) y el resto de los elementos por espectrofotometría de absorción atómica. C y N totales por combustión seca en Autoanalizador. La estimación del porcentaje de materia orgánica total se obtuvo utilizando la **Ecuación 1**.

$$\% \text{ M.O.} = \% \text{ C} * 1.43 \quad (\text{E.1})$$

Donde:

M.O. corresponde al porcentaje de materia orgánica y C es el porcentaje total de carbono.

Posteriormente, se procedió a interpretar los análisis de suelo utilizando el *Manual de interpretación de análisis de suelos y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes* (Meza *et al.*, 2018). Además, se evaluó la resistencia a la penetración de las raíces en diez árboles de los que presentaron crecimiento arbustivo y 10 árboles con crecimiento normal, por medio de un *Penetrolgger* de *Eijkelkamp* con el cono uno, así como también se analizó la estructura del sistema radicular de los árboles muestreados.



2.3 Variables evaluadas

La evaluación del ensayo se realizó a la edad de 1.5 años, 2.7 años, 3.5 años y 4.5 años. Se registró el lugar de experimento, bloque, número de fila dentro de cada bloque, código de clon, testigo y número dentro de la pareja de árboles a evaluar (1, 2 o 3) así como los datos correspondientes a las diferentes variables evaluadas.

Se midieron las variables diámetro a la altura de pecho (DAP), utilizando una cinta diamétrica graduada en centímetros diamétricos, la altura comercial utilizando una vara telescópica, graduada en centímetros y metros, y la calidad del fuste comercial, que se cuantificó con base a la calidad de las primeras cuatro trozas, siguiendo la metodología para la valoración de plantaciones forestales desarrollada por [Murillo et al. \(2004\)](#). La **Ecuación 2** permite calcular la calidad global del árbol tomando en cuenta el aporte individual de cada troza; en ese caso corresponde a un árbol cuyo fuste cuenta con cuatro trozas.

$$\text{Calidad general} = (T1 * 0.40) + (T2 * 0.30) + (T3*0.20) + (T4*0.10) \quad (\text{E.2})$$

Donde:

T1, T2, T3 y T4: Calidades (en escala de 1 a 4) asignadas a cada toza.

En vista de que la calidad general del árbol oscila entre 1 y 4, se procedió a transformar la calidad en una escala de 1 a 100, para lo cual se utilizó el algoritmo descrito por la **Ecuación 3**.

$$\text{Calidad (\%)} = 100 * [1 - ((\text{calidad general} - 1) / 3)] \quad (\text{E.3})$$

A partir de los datos de DAP y altura comercial se procedió a calcular el volumen comercial utilizando la siguiente **Ecuación 4**.

$$V_c = ((D/100)^2 * (\pi/4) * (H_{com}) * 0.65 \quad (\text{E.4})$$

Donde:

V_c=Volumen comercial

D=Diámetro a la altura del pecho en cm

H_{com}=Altura comercial estimada a partir de la cantidad de trozas comerciales posibles de 2.5 m de largo en cada árbol.

De este modo, se procedió a conformar una base de datos en Excel que unificara cada clon dentro de cada bloque todas las variables evaluadas, para cada una de las mediciones realizadas para su posterior procesamiento. Para efectos del análisis e interpretación de los resultados, se procedió a dividir el ranking genético del volumen comercial en tres grupos, a la edad de 1.5 y 4.5 años, tomando en cuenta la diferencia entre el valor mínimo y máximo, y el peso de esta diferencia con base al primer valor de referencia para cada uno de los grupos conformados. Lo anterior permitió conocer cuáles clones se mantienen en el primero, segundo y tercer grupo, permitiendo a su vez señalar los clones de rendimientos alto, medio y bajo, así como observar



el cambio de posición en el ranking genético con base al volumen comercial, de acuerdo con la edad de la plantación.

2.4 Análisis estadístico

Los análisis genéticos se realizaron utilizando el software SELEGEN, el cual se basa en el procedimiento estadístico REML/BLUP (Resende, 2016), utilizando el modelo 2, el cual se utiliza en ensayos dispuestos en bloques completos al azar, clones no emparentados, una sola localidad, con varias plantas por parcela. El modelo estadístico se presenta en la **Ecuación 5**.

$$Y = Xr + Zg + Wp + e \quad (\text{E.5})$$

Donde:

Y es el vector de los datos, r corresponde a los efectos de la repetición (que se asumen como fijos) sumados a la media general, g corresponde a los efectos genéticos aditivos característicos (que se asumen como aleatorios), p corresponde a los efectos de parcela (asumidos como aleatorios) y e corresponde a los efectos del error o residuo (aleatorios). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos (Resende, 2016).

En seguida, se realizaron correlaciones genéticas para analizar interrelaciones entre las diversas variables evaluadas, a través del modelo estadístico 102 del software SELEGEN (Resende, 2016).

3. Resultados

3.1 Características fisicoquímicas del suelo

El suelo se clasifica dentro del orden Ultisol, con una textura arcillosa, el cual presenta una densidad aparente de 1.8 gcm^{-3} . El resultado de la evaluación a la penetración de las raíces mostró que no existían diferencias entre los árboles que presentaron crecimiento arbustivo y los que no presentaron dicho crecimiento. El análisis realizado evidenció que el suelo es poco profundo, menor a 50 cm, generando un crecimiento irregular del sistema radicular, con número importante de raíces laterales y a la vez superficiales y gruesas. Lo anterior se reflejó tanto en árboles con un crecimiento arbustivo como en árboles cuya fisonomía permite clasificarlo como un individuo comercial (**Figura 1**).



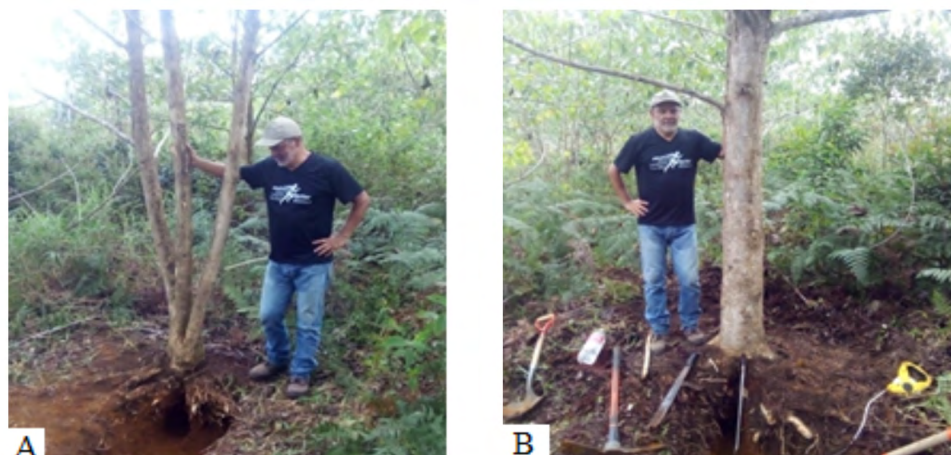


Figura 1. A. Clon de *Gmelina arborea* con comportamiento arbustivo y B. Clon de *Gmelina arborea* de buena forma en sitio marginal, La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica, 2019.

Figure 1. A. Clone of *Gmelina arborea* with bushy behavior and B. Clone of *Gmelina arborea* in good stem form at marginal site, La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica, 2019.

El análisis del suelo reflejó deficiencia en algunos elementos como el Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P), Zinc (Zn) y Manganeso (Mn); a la vez, se evidenció un pH menor 5.5, tanto en suelo de 0-20 cm como de 20-40 cm, lo que genera una acidez de 1.10 y 0.37 cmol(+)/L, respectivamente. Otro aspecto por considerar es que, a mayor profundidad del suelo, los valores de los elementos tienden a disminuir, explicado probablemente por la presencia de materia orgánica presente en el primer horizonte del suelo, la cual es de 6.5 % en los primeros 20 cm y de 3.3 % de 20-40 cm (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Análisis químico de suelo, finca La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica.

Table 1. Soil chemical analysis, La Ceniza farm, Pérez Zeledón, Costa Rica.

| Profundidad (cm) | pH (agua) | cmol(+)/L | | | | | | | mg/L | | | | | |
|----------------------|-----------|-----------|------|------|------|------|----------------------------|-----------|------|------|----|------|----|------|
| | | Acidez | Al | Ca | Mg | K | CICE | % Sat. Al | P | Zn | Cu | Fe | Mn | |
| Suelo 0 - 20 | 5.2 | 1.10 | 0.88 | 0.51 | 0.20 | 0.09 | 1.9 | 58 | 1 | 0.1 | 6 | 185 | 3 | |
| Suelo 20 - 40 | 5.1 | 0.37 | 0.25 | 0.48 | 0.16 | 0.06 | 1.07 | 35 | ND | 0.3 | 5 | 122 | 2 | |
| Relación entre bases | | | | | | | Relación Carbono/Nitrógeno | | | | | | | |
| | | Ca/Mg | | Ca/K | | Mg/K | | (Ca+Mg)/K | | % C | | %N | | C/N |
| Suelo 0 - 20 | | 2.55 | | 5.67 | | 2.22 | | 7.89 | | 4.53 | | 0.27 | | 16.8 |
| Suelo 20 - 40 | | 3.00 | | 8.00 | | 2.67 | | 10.67 | | 2.29 | | 0.17 | | 13.5 |



Además, se presentan valores elevados de Hierro (Fe), tanto en la parte más superficial como a mayor profundidad, con valores de 185 mg/L a 0 – 20 cm y de 122 mg/L a 20 - 40 cm. En cuanto a la saturación de Aluminio, el porcentaje es elevado en ambas profundidades con porcentajes de 58 % y 35 %, respectivamente (**Cuadro 1**).

La relación entre bases, por lo general, se encuentra dentro del rango óptimo, con una tendencia hacia el límite inferior de dicho rango; a excepción de la relación Mg/K y (Ca+Mg)/K, cuyos valores son de 2.22 y 7.89 cmol(+)/L, a una profundidad de 0-20 cm, respectivamente. En el caso de la relación Ca/K, esta se encuentra dentro del rango óptimo de relación entre las bases, entre ambas profundidades analizadas (**Cuadro 1**).

3.2 Parámetros genéticos

El análisis de los datos realizados con el programa SELEGEN-REML/BLUP permitió conocer el comportamiento de las variables evaluadas, las cuales muestran una precisión de los estimados aceptable (>0.5). Con relación a los parámetros obtenidos para las distintas variables, el DAP presenta mayores valores de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, comparado con las otras variables; alcanzaron los mayores valores a la edad de 4.5 años, con un valor de 0.152 y 0.849, para la heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, respectivamente (**Cuadro 2**).

La altura comercial presenta un comportamiento distinto al DAP, en vista de que, conforme aumenta la edad, los coeficientes de los parámetros genéticos varían; sin embargo, la tendencia a partir de la edad de 2.8 años es aumentar dichos valores. Los mayores valores de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, al igual que el DAP a la edad de 4.5 años donde se reflejan los valores más altos para los estimados, en concordancia con valores de 0.075 y 0.706 (**Cuadro 2**).

En cuanto a la variable volumen comercial, al integrar las variables altura comercial y DAP, es de esperar que muestre un comportamiento similar a las mismas, con relación a los valores de los estimados. Los resultados obtenidos para el volumen comercial se comportan de manera muy similar al DAP, con un incremento en los coeficientes obtenidos conforme aumenta la edad, alcanzando valores máximos a la edad de 4.5 años, con una heredabilidad individual y heredabilidad media del clon de 0.113 y 0.812, respectivamente (**Cuadro 2**).

Se observa, además, coeficientes de variación genética altos ($>10\%$) en las diferentes edades, principalmente para el DAP y para el volumen comercial, donde los valores de los coeficientes de variación genética más altos se presentan a la edad de 4.5 años, con 11.8% y 34.6%, para el DAP y volumen comercial, respectivamente, respaldado con valores de precisión altos superiores a 0.90 (**Cuadro 2**).



Cuadro 2. Heredabilidad individual y heredabilidad media del clon para las variables DAP, volumen comercial y altura comercial de melina (*Gmelina arborea*) en Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Table 2. Clone individual heritability and mean heritability for the variables DBH, commercial volume and commercial height of melina (*Gmelina arborea*) in Pérez Zeledón, southern zone of Costa Rica.

| Parámetros genéticos para diámetro a la altura del pecho (DAP) | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-----------|
| Edad (años) | H ² _g | H ² _{mc} | CV _g % | Precisión |
| 1.5 | 0.040 | 0.567 | 9.2 | 0.75 |
| 2.8 | 0.101 | 0.760 | 10.7 | 0.75 |
| 3.5 | 0.131 | 0.828 | 11.5 | 0.79 |
| 4.5 | 0.152 | 0.849 | 11.8 | 0.92 |
| Parámetros genéticos para altura comercial | | | | |
| Edad (años) | H ² _g | H ² _{mc} | CV _g % | Precisión |
| 1.5 | 0.062 | 0.626 | 5.5 | 0.79 |
| 2.8 | 0.035 | 0.505 | 5.5 | 0.47 |
| 3.5 | 0.047 | 0.552 | 6.8 | 0.59 |
| 4.5 | 0.075 | 0.706 | 10.8 | 0.84 |
| Parámetros genéticos para volumen comercial | | | | |
| Edad (años) | H ² _g | H ² _{mc} | CV _g % | Precisión |
| 1.5 | 0.012 | 0.269 | 25.6 | 0.28 |
| 2.8 | 0.063 | 0.652 | 26.4 | 0.65 |
| 3.5 | 0.092 | 0.749 | 27.6 | 0.72 |
| 4.5 | 0.113 | 0.812 | 34.6 | 0.90 |

H²_g= Heredabilidad individual, H²_{mc}= Heredabilidad media entre clones, CV_g= Coeficiente de variación genético.

Las correlaciones genéticas edad-edad entre las distintas variables muestran valores altos (>0.70). A partir de la edad de 2.8 años se presentan un aumento en los valores de correlación genética, tanto entre las variables semejantes entre sí, como entre variables diferentes, alcanzando correlaciones genéticas bastante altas a partir de los 3.5 años y 4.5 años de edad. Al correlacionar el DAP y el volumen comercial entre sí, a partir de los 2.8 años ambas variables mantienen correlaciones superiores al 0.9, mientras que para el caso de la altura comercial los valores de correlación obtenidos son superiores a 0.8 a partir de dicha edad (**Cuadro 3**).

El comportamiento de las correlaciones entre las distintas variables, como es de esperar, los mayores valores entre el DAP-VolCom, donde la mayor correlación entre ambas variables se reflejó a la edad de 4.5 con un valor de 0.97. Siguiendo este mismo análisis las correlaciones entre el DAP-AltCom, se mantienen con valores superiores a 0.6 que aumenta conforme a la edad, alcanzando el máximo valor de correlación a la edad de 4.5 años con un valor de 0.81. Las demás correlaciones entre las variables oscilan entre 0.6 y 0.8, siendo nuevamente las más altas entre el VolCom-DAP, lo cual se encuentra dentro de lo esperado (**Cuadro 3**).



Cuadro 3. Matriz de correlación genética del ensayo clonal de melina (*Gmelina arborea*) entre las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AltCom) y volumen comercial (VolCom) en Costa Rica.
Table 3. Genetic correlation matrix of the clonal melina (*Gmelina arborea*) trial between the variables diameter at breast height (DAP), commercial height (AltCom) and commercial volume (VolCom) in Costa Rica.

| Variables evaluadas y edad de medición | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--|
| Edad (años) | 1.5 | | | 2.8 | | | 3.5 | | | 4.5 | | |
| Variabes | AltCom | VolCom | DAP | AltCom | VolCom | DAP | AltCom | VolCom | DAP | AltCom | VolCom | |
| DAP | 0.61* | 0.87* | 0.73* | 0.73* | 0.78* | 0.67* | 0.74* | 0.77* | 0.62* | 0.76* | 0.71* | |
| AltCom | | 0.52* | 0.19 | 0.46* | 0.25 | 0.08 | 0.48** | 0.19 | 0.02 | 0.43 | 0.10 | |
| VolCom | | | 0.51 | 0.58** | 0.62* | 0.49** | 0.60* | 0.66* | 0.45 | 0.56** | 0.57** | |
| DAP | | | | 0.76* | 0.95* | 0.95* | 0.68* | 0.93* | 0.92* | 0.82* | 0.91* | |
| AltCom | | | | | 0.85* | 0.65* | 0.81* | 0.75* | 0.63* | 0.81* | 0.69* | |
| VolCom | | | | | | 0.89* | 0.71* | 0.94* | 0.87* | 0.84* | 0.91* | |
| DAP | | | | | | | 0.65* | 0.94* | 0.97* | 0.78* | 0.95* | |
| AltCom | | | | | | | | 0.76* | 0.62* | 0.83* | 0.66* | |
| VolCom | | | | | | | | | 0.91* | 0.82* | 0.94* | |
| DAP | | | | | | | | | | 0.81* | 0.97* | |
| AltCom | | | | | | | | | | | 0.84* | |

Nivel de significancia estadística corresponde a * = $p < 0.01\%$; ** = $p < 0.05\%$

La tendencia de la heredabilidad individual y la heredabilidad media del clon, muestran un comportamiento ascendente durante todo período de evaluación que tiende a estabilizarse a partir de las últimas dos evaluaciones, mostrando el valor máximo a la edad de 4.5 años de edad. La curva de mejor ajuste para los datos de ambas variables muestra un valor de R de 0.99, por medio de una función polinomial, tanto para la heredabilidad individual como la para la heredabilidad media del clon (**Figura 2**).



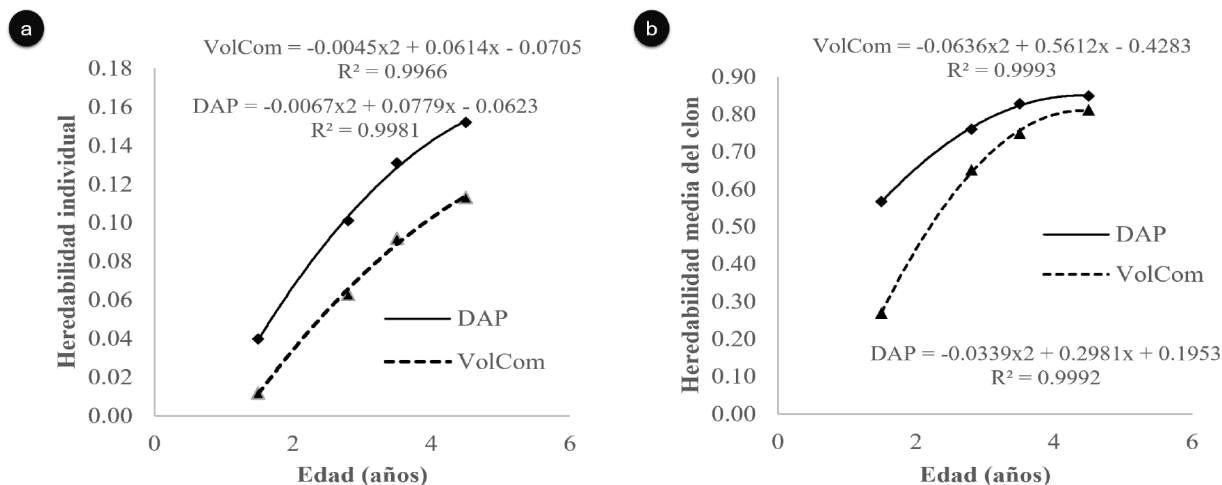


Figura 2. a) Heredabilidad individual, y b) Heredabilidad media clonal, en función de la edad para la variable DAP y volumen comercial (VolCom) en Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Figure 2. a) Individual heritability, and b) Clonal mean heritability, as a function of age for the variable DAP and commercial volume (VolCom) in Pérez Zeledón, southern zone of Costa Rica.

El promedio del valor genético para el ensayo corresponde a 0.02188 m^3 por individuo en volumen comercial a los 4.5 años de edad. A partir de este valor es posible obtener la ganancia genética realizando distintas comparaciones; por ejemplo, al comparar este promedio con la media de los genotipos que ocupan las 10 primeras posiciones, correspondiente a 0.0330 m^3 , se esperaría obtener un 12.7% de incremento en el volumen comercial; y, si se compara con el clon que ocupa la primera posición en el ranking genético del volumen comercial (0.0398 m^3), la ganancia genética estimada sería de un 27.6 %. Al hacer esta misma comparación con relación al promedio del material que se utilizó como testigo (0.0237 m^3), la ganancia genética, usando los primeros 10 genotipos del ranking, sería de 28 %; por su parte, en contraste con el genotipo que ocupa el primer lugar en dicho ranking, la ganancia genética sería de 40 % en el volumen comercial (**Figura 3**).



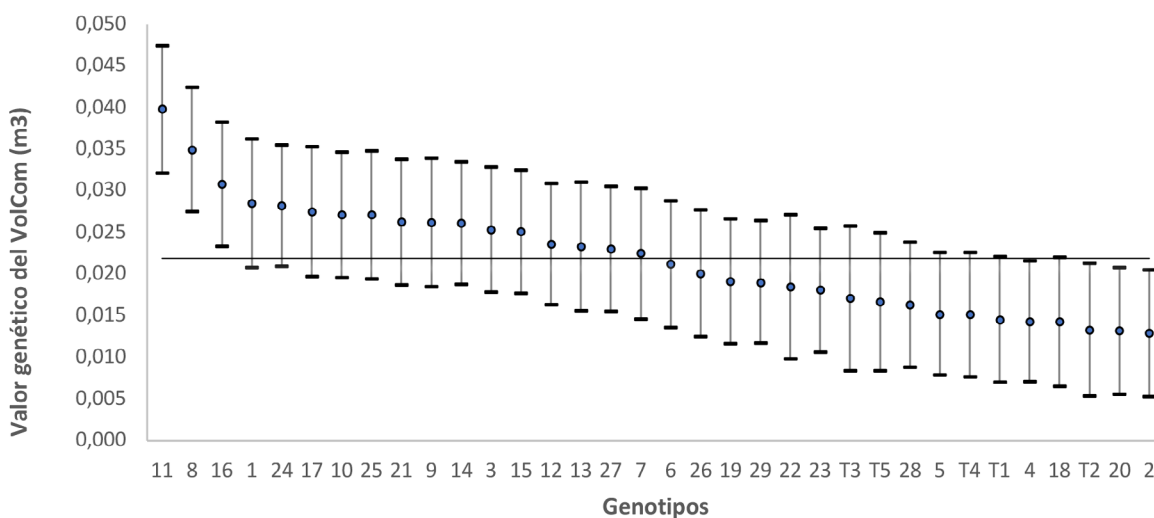


Figura 3. Ranking del valor genético del volumen comercial (m^3), estimado a los 4.5 años para 34 genotipos de melina (*Gmelina arborea*) en Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Figure 3. Ranking of the genetic value for commercial volume (m^3) estimated at 4.5 years for 34 melina (*Gmelina arborea*) genotypes in Pérez Zeledón, southern zone of Costa Rica.

Para efectos del análisis de los resultados el ranking genético para el volumen comercial, se conformaron tres grupos, lo cual muestra un número importante de clones relativamente estables que presentan un potencial importante para ser utilizados en proyectos de reforestación en sitios con características edáficas limitantes para el establecimiento de plantaciones forestales con melina. En el grupo que reúne los mejores clones, solamente el clon 8 se mantiene estable durante el período de evaluación; sin embargo, en el segundo grupo existen seis clones que, en conjunto con el clon 8, se mantienen en las primeras 10 posiciones del ranking genético, ampliando la disposición de material con posibilidades de adaptación en condiciones de suelo extremas de acidez. Los clones que muestran este comportamiento son el clon 1, 8, 10, 11, 16, 21 y el clon 24 (**Figura 4**).

Se refleja, además, clones que variaron de posición dentro del ranking genético, con relación a la distribución por cada grupo según el valor genético estimado para el volumen comercial en las edades de referencia (**Figura 4**); tal es el caso de los clones 9, 13, 22, 23 y 27 que pasaron de las primeras posiciones a otras intermedias o últimas del ranking, por otro lado, los clones 3, 9, 12, 14, 15, 17 y 25 ascendieron de posición. Se determinó que existen clones que presentan bajo rendimiento en condiciones como las presentes en el sitio, específicamente los clones 20, 18, 2 y 4, los cuales se mantuvieron en el tercer tercio del Ranking genético, ocupando las últimas posiciones dentro del mismo, durante el período de evaluación del ensayo (**Figura 4**).



| Ranking Genético | Edad en años | |
|------------------|--------------|-----|
| | 1.5 | 4.5 |
| 1 | 8 | 11 |
| 2 | 27 | 8 |
| 3 | 19 | 16 |
| 4 | 16 | 1 |
| 5 | 10 | 24 |
| 6 | 11 | 17 |
| 7 | 13 | 10 |
| 8 | 1 | 25 |
| 9 | 24 | 21 |
| 10 | 21 | 9 |
| 11 | 23 | 14 |
| 12 | 29 | 3 |
| 13 | 22 | 15 |
| 14 | 26 | 12 |
| 15 | 17 | 13 |
| 16 | 7 | 27 |
| 17 | 6 | 7 |
| 18 | 3 | 6 |
| 19 | T3 | 26 |
| 20 | 25 | 19 |
| 21 | 14 | 29 |
| 22 | 4 | 22 |
| 23 | 9 | 23 |
| 24 | 12 | T3 |
| 25 | 5 | T5 |
| 26 | 2 | 28 |
| 27 | T2 | 5 |
| 28 | 18 | T4 |
| 29 | T4 | T1 |
| 30 | 20 | 4 |
| 31 | 28 | 18 |
| 32 | T5 | T2 |
| 33 | 15 | 20 |
| 34 | T1 | 2 |

Figura 4. Ranking genético del volumen comercial de una plantación de *Gmelina arborea* de 1.5 y 4.5 años de edad, ensayo La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Figure 4. Genetic ranking for commercial volume of *Gmelina arborea* plantation at 1.5 and 4.5 years of age, La Ceniza trial, Pérez Zeledón, southern zone of Costa Rica.



4. Discusión

4.1 Características fisicoquímicas del suelo

El análisis de la profundidad efectiva permitió evidenciar que el suelo se caracteriza por ser poco profundo, característica que dificulta el crecimiento radicular de los árboles, generando una respuesta que se reflejó con un alto número de raíces gruesas, laterales y superficiales, con tendencia a comportarse como raíces principales. De acuerdo con Murillo (1996), las características de la capa de suelo de 15 a 30 cm de profundidad son las responsables de la mayor parte de las diferencias en crecimiento de las plantas, lo que explica la respuesta de los árboles y los crecimientos diferenciados a nivel clonal, evidenciando la respuesta positiva de algunos genotipos a condiciones marginales como las presentes en el sitio de estudio.

El análisis general a nivel genético permitió conocer el comportamiento de los conjuntos genéticos de la melina en condiciones de suelo bastante ácidos, con características limitantes para el crecimiento adecuado de la melina, y, de acuerdo con el análisis fisicoquímico realizado, se evidencia que el suelo se clasifica como Ultisol, con textura arcillosa, el cual se clasifica como uno de los órdenes que presenta problemas serios de acidez (Molina y Alvarado, 2012).

Se presenta un pH en agua inferior a 5.5, mostrando una acidez alta, tanto a nivel superficial (0 – 20 cm) como en la parte más profunda (20 – 40 cm) que, en conjunto con valores altos de Al y Fe y deficiencias en Mn y P, generan un suelo con niveles de acidez críticos para la melina. El porcentaje de saturación del Al o acidez intercambiable es alto, como es lo esperado por las condiciones de pH presentes en el suelo, lo cual tiene serias consecuencias en el metabolismo de los árboles, tanto a nivel bioquímico como fisiológico, afectando la división celular y por ende reduciendo el crecimiento de las raíces. De acuerdo con Sarmiento (1984), valores de pH inferiores a 5.5 recrudecen las condiciones de acidez al presentarse con frecuencia toxicidades de Al, Fe y Mn, así como deficiencias de Mo y P, elementos que precipitan en conjunto con los óxidos de hidróxidos de Fe y Al.

Otro aspecto para tomar en consideración es la deficiencia presente en otros elementos como el P, K, Ca, Zn, Mn y Mg, que está directamente asociado a los problemas de acidez presentes en el sitio, generando una baja fertilidad natural que limita el crecimiento de la especie. Las consecuencias de estos altos niveles de acidez se manifiestan de distintas maneras, como, por ejemplo, la acidificación reduce la disponibilidad de nutrimentos del suelo (P, K, Ca y Mg), provoca la movilización de elementos tóxicos como el Al, incrementa la movilidad de metales pesados y provoca variaciones en la estructura de la microflora y microfauna (Molina y Alvarado, 2012).

Otro de los factores presentes que influyen en el crecimiento adecuado de la melina se encuentra relacionado con la compactación, la cual resulta bastante alta. Esta genera una especie de barrera que impide el desarrollo adecuado del sistema radicular de los árboles, lo que se traduce en una disminución en la tasa de crecimiento. En general, estudios previos sobre calidad de sitio para melina, contemplan una serie de aspectos e indicadores que permiten definir dicha calidad, los cuales involucran los factores descritos, presentes en el sitio de plantación. Así, por



ejemplo, condiciones de suelo compactados, con valores de densidad aparente mayores a 0.9 mg m^{-3} , contenidos de Ca y Mg disponible con valores inferiores a 10 y 6 cmol (+) L^{-1} de suelo, respectivamente, suelos de textura arcillosa o franco arcillosa y altos niveles de acidez, reducen o limitan el crecimiento de la melina (Obando 1989; Stuhmann *et al.* 1994; Vallejos 1996; Vásquez y Ugalde 1995).

Con respecto a la relación entre bases (Ca, Mg y K), en la mayoría de los casos se encuentran dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de la melina, hecho que permite suponer el desarrollo normal de los procesos bioquímicos y fisiológicos de la planta. En cuanto a la relación C/N, se indica la potencialidad del suelo para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral; para el caso específico del sitio de la plantación de melina, presenta valores que de acuerdo con el rango óptimo se encuentran sobre el límite superior. Esto indica, al mismo tiempo, z una posible limitación de N, con las consecuencias que esta condición genera en el desarrollo de las plantas.

4.2 Estimación de parámetros genéticos

La heredabilidad individual y la heredabilidad media del clon son algunos de los parámetros genéticos que permiten conocer el comportamiento de los clones en términos de su potencial genético. Para el caso específico del ensayo de La Ceniza, este parámetro varía para las diferentes variables evaluadas, donde el DAP es la variable que presenta un mayor control genético que se refleja en los coeficientes de heredabilidad tanto individual como media clonal. Los parámetros genéticos de las variables evaluadas muestran valores ascendentes conforme la edad, explicado por una mayor expresión del potencial genético del material utilizado.

El volumen comercial refleja valores de heredabilidad con comportamiento similar, aunque menores al DAP, superiores a la altura comercial. La tendencia de las heredabilidades del DAP y volumen comercial es la de aumentar conforme la edad, dicho comportamiento se respalda con los valores de heredabilidad media del clon, los cuales aumentan positivamente de acuerdo con la edad y que, aunado con los coeficientes de variación genética obtenidos, permiten la de selección a partir del DAP y volumen comercial. De acuerdo con los estimados de los parámetros genéticos, la edad de selección donde se manifiesta el mayor potencial genético de los clones evaluados se presenta a partir de los 4.5 años. Esto concuerda con los mayores porcentajes de precisión que, en conjunto, garantizan una selección genética más eficiente (Pastrana *et al.*, 2012). Resultados similares se han obtenido en otras especies como *Pinus radiata* (Cotterill y Dean, 1988; Dean y Stonecypher, 2006; Haapanen, 2001). Sin embargo, Hernández *et al.* (2021a) obtuvo resultados con melina que permiten una selección de material genético a los 34 meses de edad, lo anterior se explica eventualmente por las características del sitio presentes en este estudio, en vista de que se trata de suelos muy diferentes, además de las condiciones climáticas involucradas.

El comportamiento que muestran los valores correspondientes a los coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, reflejan el potencial genético del material



utilizado, presentando una tendencia a aumentar con la edad, sin que se presente estabilidad en las curvas de dichas heredabilidades o un descenso en las mismas. Los valores obtenidos indican que el control genético es mayor para los caracteres DAP y volumen comercial, por lo tanto, la selección genética con base en estas características posibilitara las ganancias genéticas.

4.3 Correlación edad – edad

Las correlaciones genéticas a diferentes edades fueron altas y positivas cuando se correlaciona el DAP-VolCom, reflejando valores superiores a 0.9 a partir de los 2.8 años de edad. Este resultado es similar al obtenido por [Hernández et al. \(2021b\)](#) en un estudio similar con melina, en tres sitios distintos, donde las correlaciones entre el DAP y el volumen comercial siempre fueron superiores comparadas con las correlaciones entre las otras variables. Las correlaciones DAP-AltCom reflejan valores de correlación relativamente altos (>0.7), pero inferiores a los obtenidos entre DAP-VolCom. De acuerdo con [Dong \(2019\)](#), no hay una explicación clara para las diferencias en la magnitud de las correlaciones genéticas para los diferentes caracteres y, a la vez, señala que las diferencias entre especies, fase de crecimiento, condiciones de los ensayos genéticos, competición entre árboles e incluso, el tamaño de la muestra pueden ser factores contribuyentes; sin embargo, estas suposiciones requieren ser validadas en el campo.

Las correlaciones genéticas edad-edad de diferentes caracteres permiten suponer que tan estable se mantiene el ranking genético y a la vez coinciden con el comportamiento de los parámetros genéticos obtenidos, los cuales permiten definir con mayor precisión la selección genética y, por lo tanto, la edad óptima de selección ([Chen et al., 2003](#)). Esta es una de las aplicaciones prácticas de las correlaciones genéticas edad-edad, ampliamente utilizada en los programas de mejoramiento genético ([Atwood et al., 2002](#)).

4.4 Ranking genético

El ranking genético permite conocer la posición que ocupan los individuos según el aporte en términos genéticos para un carácter determinado. Para el caso de la variable volumen comercial, el 50 % de los clones se ubican por encima del valor promedio del ensayo para dicho carácter.

Lo anterior indica la posibilidad de seleccionar material dentro de este grupo de individuos, buscando obtener mayores ganancias genéticas. Al seleccionar material de los primeros diez clones del ranking, las ganancias genéticas en volumen comercial, con relación al promedio general, se traducen en 12.7 %, o, si se compara con el material utilizado como testigo, esta ganancia aumenta hasta un 28 %.

Lo mencionado presupone que existe un grupo de clones que se adaptan a condiciones de suelo que normalmente son indicadas como limitantes para la melina y que, por ende, poseen la capacidad de producir rendimientos en volumen comercial superiores a otros clones utilizados en proyectos de reforestación. La situación cambia radicalmente al seleccionar el mejor clon



del ranking genético, donde las ganancias genéticas para el carácter volumen comercial oscilan entre un 27.6 y 40 % al compararlo con el promedio general y con el material utilizado como testigo, respectivamente.

Existen clones que presentan alta estabilidad dentro del ranking genético, para el caso específico del volumen comercial. Al dividir dicho ranking en grupos de individuos que reflejan un alto, medio y bajo rendimiento, existe un grupo importante de clones que se mantiene a través del período de evaluación dentro los primeros diez lugares del ranking, que se posicionan dentro de los dos primeros tercios del ranking genético. Son clones que, desde los 1.5 años hasta los 4.5 años de edad, se mantienen dentro de las mismas posiciones, algunos con variaciones relativamente bajas. Otros clones se localizaron en el grupo de los de bajo rendimiento, los cuales, de acuerdo con los resultados, no se recomienda utilizarlos para plantar en sitios con características edáficas como las presentes en el ensayo.

5. Conclusiones

El sitio de plantación presenta características fisicoquímicas que limitan el desarrollo adecuado de la melina y, por lo tanto, afecta el crecimiento en diámetro, altura comercial y volumen comercial, reflejado en los bajos valores obtenidos para dichas variables. Sin embargo, en términos del potencial genético que posee el material utilizado, se evidencia una clara adaptación de siete genotipos que se mantienen dentro de los primeros 10 lugares del ranking genético desde la edad de 1.5 años hasta los 4.5 años, mostrando la posibilidad de seleccionar material genético con capacidad de adaptarse y crecer en condiciones de suelo limitantes para la melina.

Las mayores heredabilidades se presentaron para el carácter DAP, seguido del volumen comercial, mostrando ser las variables bajo mayor control genético en las condiciones de sitio evaluadas. La tendencia de dichas heredabilidades se presenta de manera ascendente, presentando los coeficientes más altos a la edad de 4.5 años, lo que presupone que las condiciones propias del sitio limitaron que los clones utilizados mostraran su mayor potencial genético a una edad más temprana.

Las correlaciones genéticas edad-edad evidencian el comportamiento que se presenta en términos de heredabilidades, donde los mayores valores de correlación se obtuvieron al correlacionar las variables DAP-volumen comercial, sobre todo a partir de los 2.8 años de edad, alcanzando los valores máximos a la edad de 4.5 años.

El material clonal utilizado mostró en su mayoría rendimientos superiores a los materiales testigo, los cuales se ubicaron siempre en el tercer tercio del ranking genético del volumen comercial, correspondiente a los individuos con los crecimientos más bajos de todo el ensayo. Al comparar las primeras diez accesiones con el testigo mejor posicionado en el ranking genético, se obtiene una ganancia genética de 28 % en volumen comercial.



6. Ética y conflictos de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

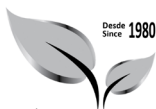
7. Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Costa Rica y al Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas por el apoyo económico para la realización de la investigación, así como también a la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), por el apoyo en la logística de las actividades de campo, al Ingeniero Donald Córdoba de CoopeAgri R.L. por el apoyo en la logística para las evaluaciones del ensayo genético. Finalmente, agradecemos a las personas revisoras anónimas y a la Revista por los comentarios realizados a la versión final del documento.

8. Referencias

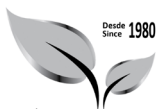
- Atwood, R. A., White, T. L., Huber, D. A. (2002). Genetic parameters and gains for growth and wood properties in Florida source loblolly pine in the southeastern United States. *Journal of Forestry Research*, 32(6), 1025–1038. <https://doi.org/10.1139/x02-025>
- Alfaro, M. A. L., Aymerich, U. N., Blanco, L. G., Bolaños, A. L., Campos, M. A., & Matarrita, O. R. (2013). Guía de diseño bioclimático según clasificación de zonas de vida de Holdridge. Universidad de Costa Rica, San José. 270 p.
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2011). Avances en el mejoramiento genético de la teca en GENFORES, Costa Rica. En *Conferencia Forestal Internacional: Bosques plantados de teca*. Teaknet. 31 octubre al 3 de noviembre, 2011. San José, Costa Rica.
- Balcorta, H. Vargas, J. (2004). Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo*, 10(1), 13-19.
- Cotterill, P. P., & Dean, C. A. (1988). Changes in genetic control of growth of radiata pine to 16 years and efficiencies of early selection. *Silvae Genetica*, 37, 138–146.
- Chen, X. Y., Hawkins, B., Xie, C. & Ying, C. C. (2003). Age trends in genetic parameters and early selection of lodgepole pine provenance with reference to the Lambeth model. *Forest Genetic*, 10, 249–258.





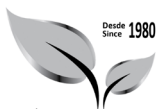
- Dean, C. A., & Stonecypher R. W. (2006). Early selection of Douglas-fir across south central coastal Oregon, USA. *Silvae Genetica*, 55, 135-141. <https://doi.org/10.1515/sg-2006-0019>
- Dong, M., Fan, Y., Wu, Z. Lv. F., & Zhang, J. (2019). Age-age correlations and early selection for growth traits in 40 half-sib families of *Larix principis-rupprechtii*. *Journal of Forestry Research*, 30, 2111-2117. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0706-6>
- Foster, G. S., & Shaw, D.V. (1988). Using clonal replicates to explore genetic variation in a perennial plant species. *Theoretical and Applied Genetics*, 76, 788-794. <https://doi.org/10.1007/BF00303527>
- Hernández, C. W., Badilla, V. Y., Murillo, G. O. (2021a). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Revista UNICIENCIA*, 35(1), 352-366. <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.22>
- Hernández, C. W., Murillo, G. O., Badilla, V. Y. (2021b). Selección temprana en ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. *Revista Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 93-106. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.42069>
- Haapanen, M. (2001). Time trends in genetic parameter estimates and selection efficiency for Scots pine in relation to field testing method. *Forest Genetics*, 8, 129-144.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2005). *Atlas Climatológico de Costa Rica*. <https://www.imn.ac.cr/atlas-climatologico>
- Jiménez, P. L. P. (2016). El cultivo de la Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el trópico. Sangolquí, Ecuador.
- Kumar, A., Luna, R. K., Parveen, K. V. (2010). Variability in growth characteristics for different genotypes of *Eucalyptus tereticornis* (SM.). *Journal of Forestry Research*, 21(4), 87-491. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0103-2>
- Meza, L. S., Esquivel, S. E., Guevara, B. M. (2018). *Manual de interpretación de análisis de suelos y cálculo de dosis de enmiendas y fertilizantes*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Molina, E., Alvarado, A. (2012). Manejo de la acidez y encalado del suelo. En A. Alvarado, J. Raigosa (Eds.), *Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica.
- Moya, R. (2004). *Gmelina arborea* en Costa Rica. *Bois et Forest Des Tropiques*, 279(1), 47-57.
- Murillo, O., Valerio, J. (1991). Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) especie de árbol de uso múltiple en América Central. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico N.º 181, 3-7.





- Murillo, O. (1992). Diseño de un huerto semillero de *Gmelina arborea* para la producción de semilla certificada en la zona norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 11(3), 51-58.
- Murillo, O., Meza, A., Cabrera, J. M. (2004). Estimación del valor real y del valor de mercado en pie de la plantación forestal. *Revista Agronomía Costarricense* 28(1), 47-55. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v28n01_047.pdf
- Murillo, R. (1996). Evaluación de algunos factores ambientales que afectan la calidad de sitio a nivel de microsítio para melina (*Gmelina arborea* Robx) plantada en suelos planos en la zona Sur de Costa Rica [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Obando, G. (1989). Construcción de modelos matemáticos de clasificación de sitios para la especie *Gmelina arborea* Roxb., aplicables a la zona Pacífico Sur de Costa Rica. Práctica de especialidad. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Padua, F. (2004). Juvenile selection of *Gmelina arborea* clones in the Philippines. *New Forest*, 28, 195-200. <https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040946.46722.1c>
- Pastrana, I., Espítia, M., Murillo, O. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 143-150.
- Resende, M.D.V. (2016). Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16, 330-339. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., Arguedas, M. (2004). *Manual para productores de melina (Gmelina arborea) en Costa Rica*. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO).
- Sarmiento, G. (1984). *The ecology of neotropical savannas*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674418554>
- Stuhrmann, M., Bergmann, C., Zech, W. (1994). Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 70, 135-145. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90081-7)
- Vallejos, O. (1996). Productividad y relaciones de índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand [Tesis de maestría]. CATIE.
- Vásquez, W., Ugalde, L. A. (1995). Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico N.º 256. CATIE.





- Wee, A., Li, C. y Dvorak, W. (2012). Genetic diversity in natural populations of *Gmelina arborea*: implications for breeding and conservation. *New Forests*, 43, 411-428. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9288-2>
- Zeaser, D. (1998). Programa de mejoramiento genético de la Ston Forestal en la zona sur de Costa Rica. En SEMINARIO, *Aumento de la rentabilidad de las plantaciones forestales: un reto ligado al uso de semilla de alta calidad*. San José, Costa Rica. 19 de mayo de 1998. Memorias de CD-ROM.

