

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Universidad Nacional de Costa Rica
Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica**



**Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo,
Énfasis en Gestión de Recursos Naturales**



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GENÉTICOS DE MELINA
(*Gmelina arborea* Roxb.) EN COSTA RICA**

Doctorante:

William Hernández Castro

Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

Diciembre, 2020

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Universidad Nacional de Costa Rica
Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica**



**Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo,
Énfasis en Gestión de Recursos Naturales**



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GENÉTICOS DE MELINA
(*Gmelina arborea* Roxb.) EN COSTA RICA**

Doctorante:

William Hernández Castro

Profesor Tutor:

Dr. Olman Murillo Gamboa

Asesores:

**Dr. Dagoberto Arias Aguilar
Dr. Alexander Berrocal Jiménez**

Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

Diciembre, 2020

Tribunal Evaluador
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Universidad Nacional de Costa Rica
Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GENÉTICOS DE MELINA (*Gmelina arborea*
Roxb.) EN COSTA RICA**

**Trabajo sometido a consideración del Tribunal Evaluador como requisito para
optar por el grado de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, con
énfasis en Gestión de Recursos Naturales.**

William Hernández Castro

Sustentante

Dr. Giovanni Sáenz Arce _____
Coordinación General del DOCINADE

Dra. Gabriela Jones Román _____
Representante Sistema de Estudios de Posgrados

Dr. Olman Murillo Gamboa _____
Director del Trabajo Final de Graduación

Dr. Dagoberto Arias Aguilar _____
Asesor

Dr. Alexander Berrocal Jiménez _____
Asesor

Diciembre, 2020

DEDICATORIA

A Dios, por todo...

A Krisya por el apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida y en los que
hemos compartido juntos, mil gracias.

A Daniel, que lo amo con toda mi alma.

A mis padres, que son mi ejemplo a seguir...

A mis hermanos y hermanas, que siempre me apoyan desde la distancia.

A todos, gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) por el apoyo brindado, tanto a nivel administrativo como en el desarrollo de la investigación durante todo este período. A la Universidad Nacional de Costa Rica, por el apoyo financiero a través de la Oficina de la Junta de Becas, a su personal, muchas gracias por su atenta y amable colaboración cuando así lo requerí.

Al Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas por el complemento de beca para financiar mis estudios e investigación desarrollada, a todo el personal que siempre estuvo atento a colaborar, a todos ellos y ellas muchas gracias.

A la Cooperativa Genética Forestal por el apoyo brindado, principalmente en la logística para la evaluación y establecimiento de los diferentes ensayos genéticos analizados. A la empresa BARCA S. A., y a CoopeAgri R. L. por la disposición y el apoyo brindado durante la evaluación de los ensayos genéticos.

Al Dr. Olman Murillo Gamboa por confiar en mi persona y brindarme la oportunidad de trabajar en conjunto, por la paciencia, los consejos, la orientación y guía durante todo el proceso. Por brindarme no solamente su apoyo sino también su amistad.

A mi equipo asesor Dr. Dagoberto Arias Aguilar y al Dr. Alexander Berrocal Jiménez por la disposición apoyarme, cuando se los solicité, por las observaciones al manuscrito y la paciencia durante este proceso.

A las compañeras del programa de posgrado Ana Hine Gómez y Yorleny Badilla Valverde por ser parte de todo este desafío, por las sufridas y carreras por entregar los trabajos en tiempo y forma, gracias a ambas por la amistad y por el compañerismo mostrado durante estos años.

A los compañeros de generación por el apoyo solidario que siempre me brindaron y por la amistad generada durante el doctorado. También al personal de las empresas y organizaciones con las que tuve el placer de trabajar, Luis Salazar, Donald Córdoba, Sergio Arias, Ricardo Lujan, Luis Fallas, Doña Yani.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	xi
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO.....	3
Importancia del mejoramiento genético.....	3
Importancia de la Melina en proyectos de reforestación	4
El Mejoramiento genético de especies forestales	6
Mejoramiento genético y propiedades de la madera de melina	8
Estimación de parámetros genéticos	9
Presentación y justificación del problema	11
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
MARCO METODOLÓGICO	14
Análisis estadístico de la información.....	16
Referencias bibliográficas	17
Capítulo I.....	20
Determinación de la edad de selección de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. (melina) en Costa Rica	20
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Introducción.....	22
Materiales y métodos	23
Resultados	28
Discusión.....	35
Conclusiones.....	38
Referencias bibliográficas	38
Capítulo II.....	42
Comportamiento de clones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. (melina) en condiciones de suelo ácidos.....	42
Resumen.....	42
Abstract.....	43
Introducción.....	44
Materiales y Métodos	45
Resultados	49
Discusión.....	57
Conclusiones.....	61
Referencias bibliográficas	62
Capítulo III.....	65
Variación y control genético de madera de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. (melina), proveniente de una plantación de 3.5 años de edad en la zona Atlántica de Costa Rica	65
Resumen.....	65
Abstract.....	66
Introducción.....	67

Materiales y métodos	68
Resultados	70
Discusión.....	77
Conclusiones.....	81
Referencias bibliográficas	82
Capítulo IV	85
Estimación de parámetros genéticos de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. (melina) en la zona Atlántica de Costa Rica	85
Resumen.....	85
Abstract.....	86
Introducción.....	87
Materiales y Métodos	88
Resultados	91
Discusión.....	100
Conclusiones.....	104
Referencias bibliográficas	105
SÍNTESIS DE RESULTADOS.....	107
CONCLUSIONES GENERALES.....	110
RECOMENDACIONES GENERALES	111
ANEXOS	112

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de área plantada por provincia con <i>Gmelina arborea</i> en Costa Rica.....	12
Cuadro 2. Fecha de establecimiento, material genético utilizado y localización geográfica de ensayos genéticos de melina.	24
Cuadro 3. Heredabilidad individual y heredabilidad media del clon para las variables DAP, volumen comercial y altura comercial de melina (<i>Gmelina arborea</i>) en Costa Rica.	29
Cuadro 4. Matriz de correlación de parámetros genéticos de tres ensayos clonales de melina (<i>Gmelina arborea</i>) entre las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AltCom) y volumen comercial (VolCom) en Costa Rica.....	33
Cuadro 5. Análisis químico de suelo, finca La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica.....	50
Cuadro 6. Heredabilidad individual y heredabilidad media del clon para las variables DAP, volumen comercial y altura comercial de melina (<i>Gmelina arborea</i>) en Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.	52
Cuadro 7. Matriz de correlación de parámetros genéticos del ensayo clonal de melina (<i>Gmelina arborea</i>) entre las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AltCom) y volumen comercial (VolCom) en Costa Rica.....	53
Cuadro 8. Valores de albura, duramen y porcentaje de medula en las trozas de <i>Gmelina arborea</i> utilizadas para el muestreo de las propiedades físicas y mecánicas, proveniente de una plantación de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.	70
Cuadro 9. Parámetros genéticos para las propiedades físicas y mecánicas de melina, zona Atlántica de Costa Rica.	71
Cuadro 10. Propiedades físicas de la madera de clones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb., zona Atlántica de Costa Rica.	73
Cuadro 11. Características dasométricas de las variables de crecimiento de ensayo clonal de <i>Gmelina arborea</i> (melina) en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.	93
Cuadro 12. Estimación de parámetros genéticos de un ensayo clonal de <i>Gmelina arborea</i> en tres edades diferentes, para los caracteres de DAP, altura comercial (AltCom), volumen comercial (VolCom) y calidad del fuste, en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.	95
Cuadro 13. Correlación de parámetros genéticos a diferentes edades de medición para los caracteres de DAP, altura comercial (AltCom), volumen comercial (VolCom) y Calidad del fuste, de un ensayo clonal de <i>Gmelina arborea</i> , en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Comportamiento de la heredabilidad individual y b) heredabilidad media clonal, en función de la edad para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), volumen comercial (VolCom), altura comercial (AltCom), y calidad del fuste en melina (<i>Gmelina arborea</i>) en Costa Rica.....	31
Figura 2. A. Clon de <i>Gmelina arborea</i> con comportamiento arbustivo y B. Clon de <i>Gmelina arborea</i> de buena forma en sitio marginal, La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica, 2019.	49
Figura 3. a) Comportamiento de la heredabilidad individual, y b) comportamiento de la heredabilidad media clonal, en función de la edad para la variable DAP y volumen comercial (VolCom) en Pérez Zeledón, Pacífico Sur de Costa Rica.	54
Figura 4. Ranking del valor genético del volumen comercial (m ³) estimado a los 4.5 años para 34 genotipos de melina (<i>Gmelina arborea</i>) en Pérez Zeledón, Pacífico Sur de Costa Rica.	55
Figura 5. Ranking genético del volumen comercial de <i>Gmelina arborea</i> de una plantación de 1.5 y 4.5 años de edad, ensayo La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.	56
Figura 6. a) Contenido de humedad, b) densidad verde y c) peso específico de clones de melina con 3 años de edad, zona Atlántica, Costa Rica.	72
Figura 7. Contracción volumétrica (a) Contracción tangencial (b), contracción radial (c), y razón de contracción (d) para clones de <i>Gmelina arborea</i> , provenientes de una plantación de 3 años, zona Atlántica de Costa Rica.	76
Figura 8. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m ³) estimado a los 34 meses de edad para 55 genotipos en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.	96
Figura 9. Ranking genético del volumen comercial de <i>Gmelina arborea</i> de una plantación de 10, 22 y 34 meses de edad, en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.	100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de la varianza del contenido de humedad de la madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.	112
Anexo 2. Análisis de la varianza de densidad verde de la madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.	113
Anexo 3. Análisis de la varianza del peso específico de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.	115
Anexo 4. Análisis de la Varianza de la contracción tangencial de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.	116
Anexo 5. Análisis de la Varianza de la contracción Radial de madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.	118
Anexo 6. Análisis de la Varianza de la contracción volumétrica de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica, Costa Rica.	119
Anexo 7. Análisis de la varianza de la relación R/T de madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.	121
Anexo 8. Ubicación de ensayos clonales El Porvenir y La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.	122
Anexo 9. Imágenes de ensayo clonal de Cariari, Pococí, zona Atlántica de Costa Rica.	124
Anexo 10. Imagenes de ensayo clonal La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.	126
Anexo 11. Croquis del ensayo clonal de Gmelina arborea localizado en Siquirres, provincia de Limón.	128

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ASTM	American standard of testing and materials
BARCA	Brinkman y Asociados Reforestadores de Centro América S.A.
CACH	Centro Agrícola Cantonal de Hojanca
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
DAP	Diámetro a la altura del pecho
GENFORES	Cooperativa de Mejoramiento Forestal
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
INISEFOR	Instituto de Investigación y Servicios Forestales
INFOSTAT	Software Estadístico
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica
SELEGEN	Sistema Estadístico y Selección Genética Computarizada
SCPM	Smurfit Cartón y Papel de México

INTRODUCCIÓN

La melina es una especie forestal de gran importancia en muchas áreas tropicales de todo el mundo, es considerada como una opción para asegurar el suministro de materia prima (madera) para la industria forestal (Balcorta y Vargas 2004, Kumar 2007, Adebisi et al. 2011, Wee et al. 2012). En Costa Rica se ha utilizado en proyectos de reforestación con objetivos comerciales, debido a su extraordinaria tasa de crecimiento y rendimiento en plantación (Rojas et al., 2004), además de adaptarse con facilidad a una variedad de condiciones de suelo (Indira, 2006).

Desde su introducción en Costa Rica a finales de los años 60, su aceptación en el mercado local ha venido en aumento. Se considera como la principal especie para la producción de tarimas en Costa Rica, pero las bondades de su madera le han permitido incursionar en numerosos productos de construcción hasta la industria del mueble (Alfaro y De Camino, 2002, Rojas et al., 2004). En vista de lo anterior, surge la necesidad de implementar paquetes tecnológicos que incorporen las técnicas de reforestación clonal, a través de programas avanzados de mejoramiento genético, además de las prácticas silviculturales, en el establecimiento y manejo de plantaciones con estrictos controles de calidad. La experiencia del mejoramiento genético con melina se debe a que es de fácil reproducción, rápido crecimiento y floración temprana (cortas generaciones de reproducción) y buena respuesta a la selección, presenta gran variación fenotípica combinada con alta heredabilidad de características de interés comercial (Lauridsen y Kjaer, 2002).

Los primeros programas de mejoramiento genético en la región centroamericana con melina fueron iniciados por el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) a finales de los años setenta. Este programa formó parte de un esfuerzo internacional para evaluar procedencias nativas del sudeste asiático y razas locales desarrolladas en África y Brasil (Rojas et al., 2004). A finales de los años 80's el CATIE continúa con el mejoramiento genético de la melina (Mesén, 1990; Cornelius y Hernández, 1995). A mediados de los años 90, la compañía Ston Forestal desarrolló su

programa de mejoramiento genético con melina en la zona sur de Costa Rica y se convirtió en pionera en este campo (Zeaser, 1996).

Posteriormente, el Centro Agrícola Cantonal de Hojanca (CACH), con el apoyo del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), se convirtió en uno de los principales proveedores de semilla seleccionada en la región centroamericana, en donde el material producido provenía de una red de rodales semilleros (Barquero, 1987; Barrantes, 1999). A partir de la década de los 90, varias empresas privadas y organizaciones como Ston Forestal y Maderas Cultivadas, MACORI, CACH, empiezan programas propios de mejoramiento genético, apoyados por investigadores del CATIE y el TEC (Murillo, 1992; Zeaser, 1998, Resende, et al., 2018).

En los últimos años, GENFORES (Cooperativa de Genética Forestal) volvió a retomar los programas de mejoramiento genético de melina en Costa Rica, basado en una estrategia clonal (Murillo, et al., 2003; Badilla, et al., 2003; Chacón y Murillo, 2005; Salas, 2012). La melina fue la especie de mayor producción en los viveros forestales de Costa Rica en los últimos años con cantidades cercanas a los 3 millones de plantas y posiblemente la de mayor reforestación nacional, donde más de un 60% del material utilizado fue por reproducción clonal, proveniente de programas de mejoramiento genético local (Murillo y Guevara, 2013).

Otras experiencias a nivel latinoamericano han sido documentadas, donde el interés por el mejoramiento genético de la especie también ha sido considerado como un tema de importancia para el éxito de los proyectos involucrados. En 1996 se inició un proyecto de plantaciones comerciales de melina en el Estado de Campeche, México, con el propósito de iniciar un programa de mejoramiento genético, por parte de SCPM (Smurfit Cartón y Papel de México), compañía de productos forestales. Actualmente, en México, solo se reportan estudios a nivel fenotípico de la especie, evaluando algunas características de interés económico, tales como el volumen, la rectitud del fuste y la densidad de la madera en plantaciones de tres años de edad (Balcorta y Vargas, 2004).

En Colombia, existe un mayor avance, posiblemente a la mayor capacidad instalada. El programa de mejoramiento genético para melina en Monterrey Forestal Ltda. cuenta con un rodal semillero de 20 ha de extensión, huerto semillero clonal de primera generación

(55 clones), banco clonal (61 clones de 23 procedencias de África), ensayos de progenie/procedencia (107 familias de Tailandia y 150 de plantaciones de Monterrey, 39 familias de tres procedencias de Tailandia y 13 procedencias de Myanmar), un huerto semillero clonal de segunda generación y un jardín de estacas con 210 clones (Rodríguez, 2004).

Recientemente se han desarrollado estudios para estimar el potencial de ganancia genética esperada, basado en la selección fenotípica de árboles plus en los departamentos de Córdoba y Magdalena, como parte del desarrollo de mejoramiento genético con melina en el caribe colombiano (Espitia et al., 2016). La falta de información sobre el potencial genético y desempeño de materiales genéticos específicos de melina, de acuerdo con el sitio, dificultan el ordenamiento forestal, en aras de lograr un manejo intensivo de la especie que maximice la producción por unidad de superficie. Existe relativamente poco conocimiento sobre el crecimiento y la forma de los materiales genéticos de melina, además de la escasa o nula información sobre su desempeño en distintas condiciones de sitio (Ávila, et al. 2015).

MARCO TEÓRICO

Importancia del mejoramiento genético

Los problemas de producción y abastecimiento de materia prima no se van a solucionar solamente con el establecimiento de plantaciones forestales. Se requiere, además, desarrollar programas de mejoramiento genético con el objetivo de mejorar las plantaciones forestales, que logren aumentar la productividad y calidad de la madera (Zobel y Talbert, 1988). Como sistema productivo, se persigue con el mejoramiento genético afrontar algunos retos sobre todo en proyectos de plantaciones forestales, los cuales pueden ser superados por medio del desarrollo de clones resistentes al ataque de plagas y enfermedades, clones que se adapten a diferentes condiciones ambientales, sobre todo a nivel de suelo y clima, la producción y utilización de la madera para la elaboración de productos específicos, entre otros.

El mejoramiento genético está orientado a optimizar las características de importancia económica con algún grado de control genético. Lo que resulta en un aumento de la tasa de crecimiento de los árboles, de la calidad de los productos elaborados, la resistencia a plagas y enfermedades y a aumentar sobrevivencia (Pavlotzky, 2012). Sin embargo, el éxito de un programa de mejoramiento genético dependerá también del rigor en su evaluación y precisión en su selección genética (Espitia et al., 2010).

Los esfuerzos que se realizan a nivel nacional y en algunos otros países de Latinoamérica, en materia de mejoramiento genético de la melina, cobran importancia, en la medida que los resultados obtenidos se traduzcan en un mayor rendimiento en producción y en utilidad económica, con su consecuente impacto en el sector forestal en general. Sin embargo, la realidad es que los programas de mejoramiento están más avanzados en unos países. En Costa Rica existe un programa formal de mejoramiento genético con melina con más de 10 años de avance (Salas, 2012), pero que requieren dar un salto significativo. Ya no solo evaluando material genético, sino avanzando hacia una segunda generación de mejoramiento, donde se identifique el material de mejor calidad y productividad para cada región y condición de sitio.

Importancia de la Melina en proyectos de reforestación

La melina es una especie de porte alto, nativa de buena parte de las regiones tropicales del sureste de Asia, que se extiende por 11 países en regiones tropicales y subtropicales. Tiene un crecimiento rápido, se adapta bien a diferentes regímenes de precipitación y produce una madera versátil con excelentes propiedades físico- mecánicas. Esta especie se encuentra plantada desde zonas con una precipitación de 4500 mm y con dos meses secos al año, hasta zonas donde la precipitación es menor a 1000 mm al año, con temperaturas de 18 a 38°C y altitudes hasta los 600 m (Alfaro, 2000). Tanto en América Central como en otras regiones tropicales, la melina ha sido plantada extensiva y frecuentemente con resultados positivos.

En Costa Rica el establecimiento de plantaciones forestales de melina ha cobrado importancia, debido a la diversidad de productos que se obtienen a partir de la materia prima (madera), lo que ha generado una base industrial forestal de enorme potencial.

Para el año 2004, aproximadamente 700,000 ha de melina habían sido establecidas en diversos tipos de plantaciones en África, el sureste de Asia, el Pacífico sur y el norte de América Latina, distribuidas aproximadamente en un 11% en Latinoamérica, 36% en África y un 53% en la India. Se espera que para el año 2020, las áreas de plantación se hayan extendido a 800,000 ha (Dvorak, 2003).

El rápido crecimiento de la melina y el retorno de inversión en un período de tiempo relativamente corto, así como la versatilidad de la madera para la fabricación de muebles y diversos productos, permitió que la especie se posicionara como una de las de mayor interés para el establecimiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales. De acuerdo con Alfaro y De Camino (2002), en América Central existen un total de 225,000 ha de plantaciones forestales, de las cuales 52,000 ha (23%) han sido plantadas en Costa Rica y Guatemala, con la especie melina, para propósitos comerciales.

El proyecto Madeleña del CATIE, en la década de los 90's promovió el establecimiento de plantaciones de melina en Panamá, Nicaragua, El Salvador y Honduras, pero básicamente para fines demostrativos y para la producción de madera para leña. Para el consumo local, no existen registros de ninguna área importante reforestada con melina en estos países.

En Costa Rica, la primera plantación de melina se estableció en 1966 en Manila de Siquirres, en el Región Caribe, por la empresa Celulosa de Turrialba. El área de esta plantación fue de 2,000 ha y la semilla usada fue traída por Daniel Ludwig, de 20 diversos sitios en donde el árbol crecía naturalmente (en especial en Asia). Este trabajo fue parte de un ensayo de procedencias realizado para una empresa brasileña ubicada en Jari, Brasil (Lega, 1988). De forma paralela, se empezó a nivel nacional con el programa de incentivos estatales y la melina se consolidó como una de las principales especies a utilizar en los programas de reforestación debido a su buen desarrollo silvicultural (Moya, 2004; Rojas et al., 2004).

Para el caso de Costa Rica, la melina se ha utilizado en proyectos de reforestación desde 1979, sin embargo, no fue sino hasta el año 1986 que la especie comenzó a ser usada en proyectos de mayor escala. Desde 1986, el área plantada con la especie melina incrementó alcanzando su máxima tasa anual en 1993, con 9,500 ha. A partir de 1994 a

1997 el área plantada comenzó a decrecer significativamente debido a la incertidumbre acerca de la disponibilidad de apoyo financiero para proyectos de reforestación a través del programa de incentivos forestales.

Hasta 1997 existía un total de 49,300 ha plantadas con melina en Costa Rica, las cuales representaban el 94% del total del área que había sido reforestada con especies forestales en América Central y el 22% del total reforestado en la región (Alfaro y De Camino, 2002). En otros países importantes de la región se plantó melina a un nivel aceptable. Los casos más prominentes reportados fueron México desde los años 70's (Patiño et al., 1993; Lauridsen y Kjaer, 2002), en Venezuela con la empresa Smurfit Cartón de Venezuela, en Colombia (Rincón, 2009) y en Guatemala.

El Mejoramiento genético de especies forestales

El mejoramiento genético es un conjunto de técnicas que consisten, básicamente, en “modificar” una o más características de un grupo de plantas de una determinada especie, con el fin de obtener mejores genotipos, para atender la demanda del productor y consumidor, ya sea para aumentar la productividad o adaptación y resistencia a factores bióticos y abióticos (Oliveira, 2007).

Para obtener el éxito en un programa de mejoramiento con especies forestales, es indispensable el conocimiento del producto de interés comercial, del germoplasma o material reproductivo disponible, de las técnicas de mejoramiento, así como también de los factores ambientales que influyen en la manifestación fenotípica (Resende, 2002). La experiencia del mejoramiento genético forestal en Latinoamérica se considera como una ciencia relativamente nueva, donde países como Brasil y Chile han estado a la vanguardia.

En Costa Rica se han implementado programas de mejoramiento con diversas especies forestales, con iniciativas de empresas privadas principalmente, apoyados por la academia (caso de GENFORES), que han permitido establecer convenios para potenciar el desarrollo de dichos programas de mejoramiento (Murillo y Guevara, 2013). Estos programas por lo general buscan mejorar la productividad de las plantaciones forestales,

trabajando en aspectos como; uniformidad de las plantaciones, forma de fuste, resistencia a enfermedades, diámetro de copas, entre otros.

En un programa de mejoramiento genético los problemas principales están relacionados con la población a ser utilizada, la definición de los métodos utilizados para agrupar los caracteres deseados en los individuos mejorados, la producción del material reproductivo a escala mayor, así como el mantenimiento de la base genética para garantizar el futuro del programa de mejoramiento (Pires, 1996). Otro factor indispensable en un programa de mejoramiento genético es la población base, la cual ejerce influencia directa en la obtención de genotipos superiores y con su manejo es posible promover el mejoramiento.

Esta población base está constituida por un conjunto de plantas que el genetista forestal manipula para promover el mejoramiento genético, que está compuesta por distintos tipos de accesiones (familias, clones, procedencias, principalmente). En su conjunto debe albergar la mayor variabilidad genética posible o amplia, que permita su desarrollo y mantenimiento a largo plazo. El otro elemento esencial, es que los individuos que la componen deben ser los mejores de cada localidad, en función de los objetivos deseados de mejoramiento, usualmente crecimiento, calidad de fuste, calidad de la madera, entre otros caracteres deseables.

El mejoramiento genético de especies forestales, parte de la selección de la especie y/o procedencia, posteriormente de la selección individual dentro de la población base. Utiliza variabilidad genética natural existente entre poblaciones y entre individuos, de manera que el éxito del mejoramiento genético se determina de acuerdo con la calidad de los árboles seleccionados y la ganancia genética obtenida. Que dependerán del control genético de las características de interés y de la variabilidad existente en la población (Zobel y Talbert, 1988).

La silvicultura clonal intensiva se fundamenta en la reproducción de individuos superiores, con base en técnicas de propagación vegetativa, a través del enraizamiento de propágulos, que se orienta en el establecimiento de ensayos clonales y áreas de multiplicación clonal. Con el mejoramiento genético, apoyado con la silvicultura clonal intensiva, se pretende obtener como resultado un mejor crecimiento, madera más

uniforme, mejor resistencia a las enfermedades y productos de mayor calidad, tanto para los mercados locales como los internacionales (Dvorak, 2003).

Como sistema productivo, con el mejoramiento se persigue afrontar algunos retos, sobre todo en proyectos de plantaciones forestales puras. Que pueden ser superados por medio del desarrollo de clones resistentes al ataque de plagas y enfermedades, clones que se adapten a diferentes condiciones ambientales, sobre todo a nivel de suelo y clima, la producción y utilización de la madera para la elaboración de una gran variedad de productos, entre otros.

De acuerdo con Rojas et al., (2004) la melina es una especie que responde bien a la selección, donde en una sola generación se observa una nueva población de árboles con buenas características de fuste y tasa de crecimiento. Una vez que se ha realizado una cuidadosa selección de individuos, con buenas características de crecimiento, de calidad de fustes y de hábitos de ramificación, es posible lograr en una primera generación de mejoramiento progenies que superen en más de un 25% a los materiales comerciales disponibles. La aplicación de un alto rigor en la selección de los árboles plus tendrá una alta correlación con la ganancia genética esperada (Zobel y Talbert, 1984).

Mejoramiento genético y propiedades de la madera de melina

Sin programas de mejoramiento genético, la melina presenta como una de sus principales limitantes, la baja calidad de fustes para la producción de madera sólida. Por lo tanto, el mejoramiento genético debe estar enfocado en mejorar características como rectitud del fuste, ausencia de bifurcaciones, ausencia de reiteraciones, ángulo de inserción de ramas y grosor de ramas, que garanticen la calidad de la madera a producir. La tolerancia a enfermedades y la adaptación a suelos ácidos, deben también ser considerados como caracteres de importancia en todo programa de mejoramiento con melina, temas que se abordan paralelamente de manera integral, a través de investigaciones puntuales desarrolladas dentro de la estrategia de mejoramiento liderada por GENFORES.

Además, es necesario que dentro de este tipo de programas se incluya caracteres relacionados con propiedades de la madera. Por lo general, la selección de árboles se

realiza con base en su longitud de fibra y su peso específico básico, por ser los caracteres de mayor impacto económico. Estudios con melina para la producción de biomasa para bioenergía, en plantaciones de alta densidad, mostraron que la especie presenta características altamente deseables para fines energéticos y alta producción de biomasa, siendo la especie más recomendada para zonas bajas de Costa Rica, reflejando el potencial de las propiedades de la madera de melina para objetivos diversos (Arias, et al., 2017). Para determinar los parámetros genéticos y el potencial de mejoramiento, en primera instancia, los ensayos de procedencias permiten evaluar el material de poblaciones donde la especie habita naturalmente, así como también el material proveniente de sitios donde la especie fue introducida con éxito (Rojas, et al., 2004).

Estimación de parámetros genéticos

La estimación de parámetros genéticos permite obtener información sobre la naturaleza de la acción genética en la herencia de los caracteres permitiendo la base para la evaluación requerida por el mejoramiento, además de ofrecer información esencial para la selección y definición de programas de mejoramiento de una población (Marques-Junior, 1995, Murillo et al., 2012). Estas estimaciones son necesarias cuando se desea predecir ganancias genéticas, evaluar la viabilidad de un programa de mejoramiento, así como también apoyar de forma efectiva el progreso genético en dichos programas.

Dentro de los parámetros más importantes se destacan los coeficientes de variación genética y la heredabilidad, las correlaciones genéticas y fenotípicas entre caracteres y la precisión de la selección (Cruz, 2005). La estimación precisa de parámetros genéticos es indispensable en el mejoramiento genético. Para la estimación de los componentes de la variancia genética es importante que los individuos sean originados a partir de una población base amplia, y que, por lo tanto, se debe conocer el grado de parentesco entre los materiales evaluados.

La varianza genética aditiva se destaca entre los parámetros estimados, por ser el principal indicador de las propiedades genéticas en una población y responsable de promover el mejoramiento, el efecto aditivo de los genes controla la mayoría de los caracteres cuantitativos de importancia económica (Falconer, 1987).

Los programas modernos buscan ganar tiempo sin detrimento de la ganancia genética. Por lo que determinar la edad temprana de selección se convierte en un tema esencial, cuando el material genético no haya mostrado ya su potencial, considerando que el tiempo es un factor determinante en la toma de decisiones, sobre todo en la actividad forestal, donde los resultados del mejoramiento son a largo plazo y el desarrollo de programas de mejoramiento es materia compleja y se requiere por lo tanto ser lo más eficiente posible.

Existen varios factores que interfieren en el proceso de selección temprana, tales como la edad, las condiciones climáticas, condiciones edáficas, así como el manejo silvicultural, los cuales deben ser contemplados a la hora de realizar análisis genéticos comparativos y proyecciones a nivel de especies, los cuales a menudo son contrarrestados por un buen diseño experimental que contemple dichas diferencias a nivel de sitio y de esta manera contrarrestar las diferencias intraespecíficas en los ensayos genéticos clonales, con el propósito de obtener el máximo beneficio con la selección. Para cualquier genetista forestal es clara la importancia de optimizar el tiempo demandado para realizar un ciclo de selección y, consecuentemente, promover la maximización de la ganancia genética por unidad de tiempo (Marques Junior, 1995).

Por esa razón el genetista forestal busca identificar las características de los árboles en edades juveniles, que estén correlacionadas con aquellas de interés económico en la fase adulta. De manera que la evaluación genética debe ser rigurosa y bien estructurada, de forma que favorezca la obtención de parámetros genéticos confiables y, que posibiliten la predicción, en fase juvenil, del comportamiento del individuo adulto para los caracteres de mayor interés. La coincidencia del comportamiento relativo en la edad juvenil y adulta es esencial para la determinación de la eficiencia del mejoramiento de especies forestales (Castro, 1992).

Dentro de las principales ventajas de la selección temprana se encuentra, el establecimiento de ensayos de campo más cortos en el tiempo, mayor facilidad para la recolección de datos y mayor flexibilidad con relación a los cambios de los objetivos propuestos para el programa de mejoramiento (Dean et al., 2006). De acuerdo con Marques Junior (1995), la eficacia de la selección temprana está relacionada con la

existencia de la correlación de parámetros genéticos entre las edades estudiadas, donde es más eficiente en edades más próximas a la edad de rotación de la plantación.

Si la correlación de parámetros genéticos es alta podría indicar al genetista que la selección temprana es una estrategia viable. La selección temprana es un caso particular de la selección indirecta, que está basada en estudios de correlación “edad-edad”, en donde se obtiene el valor de la correlación entre parámetros genéticos, fenotípica y ambiental, necesarias para la predicción del progreso genético esperado (Vargas y Adams, 1992).

De acuerdo con Kageyama (1983), los parámetros genéticos varían con la edad de los individuos. De ahí la importancia de conocer la estimación de la edad óptima de selección de la melina, de acuerdo con las características propias de cada conjunto genético y según las condiciones ambientales prevalecientes. Si los objetivos de producción son el papel, combustible, tarimas u otros, con turnos de rotación esperados de 4 a 6 años, entonces sería posible seleccionar a los dos años (Dvorak, 2003).

Si los objetivos de producción son plywood, madera sólida para vigas, muebles u otros usos, los turnos de rotación esperados son de 10-12 años, la recomendación es de seleccionar a los 3 años de edad (Hodge y Dvorak, 2003), sin embargo, no existen indicios que permitan constatar esta afirmación y su posible aplicabilidad en diferentes regiones tropicales.

Presentación y justificación del problema

El sector forestal productivo de Costa Rica ha sufrido a lo largo de varias décadas cambios que le han permitido acumular experiencias para evolucionar hacia un entorno que exige competitividad y desarrollo sostenible con mayor visión. A finales de los años 70's, el inicio de los incentivos para la reforestación (MINAE, 2002), motivaron el establecimiento de proyectos de plantaciones forestales para la producción comercial de madera.

Lo anterior generó experiencia a nivel de especies forestales a utilizar, manejo silvicultural adecuado y conocimiento técnico/científico para fundamentar con mayor

criterio el direccionamiento de los esfuerzos nacionales para potenciar un sector más competitivo, más organizado y con mayores posibilidades de crecimiento económico, social y ambiental.

Actualmente, Costa Rica sufre un déficit de madera para el consumo nacional, que genera una balanza comercial negativa entre importaciones y exportaciones de productos de la madera (Barrantes y Ugalde, 2013). De acuerdo con datos del último censo agropecuario existen 18. 235 hectáreas de melina en Costa Rica (INEC, 2014), distribuidas en diferentes regiones del país (Cuadro 1).

Cuadro 1. Distribución de área plantada por provincia con *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Provincia	Área Plantada (ha)	Porcentaje (%)
San José	937.8	5.1
Alajuela	7342.7	40.3
Cartago	86.4	0.5
Heredia	857.6	4.7
Guanacaste	2447.1	13.4
Puntarenas	3203.3	17.6
Limón	3360.3	18.4

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2014.

sin embargo, es muy probable que esta cifra hay disminuido a la fecha, debido a la disminución del área plantada anualmente, producto de la competencia con otras opciones de uso de la tierra con sistemas productivos agrícolas de mayor competitividad y rentabilidad, como la piña, la palma africana, el banano, la yuca, entre otros (INEC, 2014), esta realidad exige un nivel de eficiencia y rendimiento mayor de las plantaciones forestales. Por lo tanto, avances en programas de mejoramiento genético con melina, tendrían un alto impacto en la calidad, productividad y competitividad de las plantaciones forestales del país y, mayor atracción como actividad para los inversionistas.

A partir del año 2000, GENFORES retoma los programas existentes de mejoramiento genético con melina en Costa Rica. Dicha Cooperativa agremia empresas y organizaciones del país dedicadas al fomento y a la producción forestal. Su propósito ha sido la generación de conocimiento que permita una adecuada toma de decisiones fundamentada en los diversos procesos del mejoramiento y, de esta manera, generar mayores rendimientos en la producción (Murillo et al., 2001, Murillo et al., 2011).

No obstante, como en todo sistema productivo, surgen y existen vacíos de información que deben ser atendidos para completar el ciclo de selección y mejoramiento genético de la melina. Parte esencial en un buen programa de este tipo, es lograr la evaluación genética de la población de mejoramiento, de la manera más precisa y exhaustiva posible. A partir de esta evaluación, se logra seleccionar la subpoblación denominada comercial, es decir, la que se producirá a gran escala y abastecerá de material para establecer las plantaciones comerciales de las empresas. Esta población comercial está basada en la construcción de un buen ranking genético de la población para poder elegir el “Top” 15 ó 20 mejores genotipos.

En este proceso se requiere tener buenos estimados de parámetros genéticos poblacionales, tales como; interacción genotipo – ambiente, (decidir si se necesitará un solo programa de mejora para todo el país versus programas regionales), edad óptima de selección, identificación de caracteres juveniles de interés económico, comparación del material genético entre programas existentes, así como estimación de heredabilidad individual, heredabilidad media clonal, precisión de selección, coeficiente de variación genotípica, entre otros. Estos parámetros genéticos no son conocidos en la región centroamericana, no han sido abordados anteriormente en ningún otro estudio. Como pregunta de investigación, se plantea la siguiente: *¿Cuáles son los coeficientes de los parámetros genéticos que caracterizan la población de mejoramiento genético de melina utilizada en el país?*

OBJETIVO GENERAL

- Estimar los parámetros genéticos de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) para optimizar la estrategia de mejoramiento genético a largo plazo en GENFORES, con el propósito de mejorar su productividad en plantación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros genéticos de las accesiones que conforman la población del programa de mejoramiento genético de melina en GENFORES.
- Estimar la edad óptima de selección genética de melina en Costa Rica, a través de la evaluación de los conjuntos genéticos utilizados por GENFORES.
- Generar estimados genéticos que permitan definir la población comercial de mejoramiento genético de melina utilizada por GENFORES, buscando la posibilidad de desarrollar un solo programa de mejoramiento de melina en Costa Rica.
- Evaluar los conjuntos genéticos de *Gmelina arborea* en diferentes condiciones edafoclimáticas y sus propiedades físico-mecánicas de la madera, que son utilizados en proyectos de reforestación comercial en Costa Rica.

MARCO METODOLÓGICO

La investigación inició con el establecimiento de ensayos genéticos de *Gmelina arborea* en el campo, ubicados en diferentes regiones de Costa Rica, a saber, zona Atlántica y Pacífico Central, con el fin de evaluar el comportamiento de los conjuntos genéticos, la interacción genotipo-ambiente, respuesta al manejo silvicultural y a condiciones de suelo y clima diferentes, así como también, conocer algunas características físico-mecánicas de la madera de melina.

Los ensayos genéticos se establecieron siguiendo el diseño experimental procedencia/clon desarrollado por GENFORES (Murillo et al., 2012), que consiste en un diseño de parcelas divididas con 6 bloques y 4 plantas (rametos) por bloque (parcela genética). La parcela mayor es la procedencia (colección de una empresa) y la parcela menor es el clon perteneciente a la procedencia. Las mediciones se realizaron anualmente en un rango de tiempo superior a los seis meses, dependiendo del crecimiento de los árboles en el campo. Cabe mencionar que los datos analizados

productos de las mediciones realizadas provenían de ensayos genéticos establecidos previos al proyecto de investigación de tesis por GENFORES, de ahí que las mediciones hacen referencia a diferentes edades para cada ensayo y sitio, de manera general los datos de la primera medición de los cuatro ensayos evaluados fueron realizados por personal a cargo de las empresas agremiadas a GENFORES, el resto de las evaluaciones y mediciones fueron asumidas por el tesario.

Específicamente se evaluaron cuatro ensayos a diferentes edades, dos localizados en Pérez Zeledón, denominados La Ceniza y El Porvenir, otro localizado en Siquirres, provincia de Limón y otro en Cariari cantón de Pococí, provincia de Limón. Para el caso del ensayo de La Ceniza se utilizaron seis plantas por clon, mientras que para los otros tres ensayos se usó dos parejas por rameto.

Para la recolección de información se elaboró un instrumento (formulario de campo) que me permitió recabar todos los datos de las variables evaluadas de cada uno de los conjuntos genéticos (clones), de la manera más completa posible y de acuerdo con los propósitos de la investigación. En este formulario se anotaron para cada ensayo, lugar de experimento, bloque, clon, testigo y número dentro de la pareja de árboles a evaluar (1 ó 2), además, manteniendo siempre la codificación de los tratamientos respectivos, así como los datos correspondientes a las diferentes variables a evaluar.

Las variables evaluadas en su mayoría son cuantitativas y se midieron por medio de instrumentos que permiten obtener los datos directamente, por ejemplo, la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP, 1.3 m desde el suelo), medición de la altura comercial (se mide la primera troza de 2,5 m en pie, y se proyecta las otras trozas de igual longitud, hasta el ápice, para determinar la altura total en metros), que en edades juveniles es posible medir directamente, o bien, en plantaciones de mayor edad, se utilizan instrumentos (como el Vertex Forestal) que permiten estimar dicha altura. Se evaluó la calidad del fuste con base a la calidad de las primeras trozas, donde 1 es la máxima calidad para aserrío y 4 es una troza sin valor comercial o solamente utilizable para leña.

Para la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de la madera, se procedió con el derribo de árboles que conformaron una muestra representativa de la población, a partir de la cual se obtuvo las muestras de madera que se utilizaron en los análisis de laboratorio, para determinar los valores de peso específico básico, densidad verde, contracción radial, volumétrica y tangencial, entre otros.

Análisis estadístico de la información

Con la información obtenida se procedió a conformar bases de datos en el programa Excel, donde se revisó y se verificó la información colectada en el campo, con base a la comparación de los datos de medición obtenidos periódicamente. Posteriormente, mediante el software SELEGEN, versión 2016, el cual se basa en el procedimiento estadístico REML/BLUP (Resende, 2016), se procedió utilizando el modelo 2, que procesa datos de ensayos dispuestos en bloques completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, también se utilizó el modelo 102 que permite realizar análisis de correlación genética edad-edad para las variables evaluadas. Para el caso específico del análisis de las propiedades de la madera, se realizaron análisis de varianza para algunas de las variables evaluadas, para determinar diferencias estadísticamente significativas entre las mismas, utilizando el software estadístico Infostat.

A partir del análisis genético el software SELEGEN permite obtener un ranking de los individuos, comparado con el testigo. De manera que genera un ranking de los mejores árboles de acuerdo con el comportamiento de sus progenies. Además, las correlaciones genéticas (modelo 102) permitan analizar interrelaciones entre las diversas variables evaluadas, tales el DAP, altura comercial, volumen comercial, calidad del fuste, propiedades físico-mecánicas, para todos los ensayos clonales. Finalmente, con base el análisis genético determinar la edad óptima de selección de la melina, la posición de los mejores clones en el ranking genético, de acuerdo con las características edafoclimáticas presentes en los ensayos y conocer algunas de las propiedades físico-mecánicas, lo anterior, permite contar con información que respalde la toma de decisiones tanto a nivel de GENFORES, como a nivel de empresas e interesados, relacionados con la reforestación comercial de *Gmelina arborea*.

Referencias bibliográficas

- Adebisi, M., Adekunle, M., Odebiyi, O. 2011. Effects of fruit maturity and pre-sowing water treatment on germinative performance of *Gmelina arborea* seeds. *Journal of Tropical Forest Science* 23(4), 371-378.
- Alfaro M., 2000. Melina: la madera del futuro. *Revista Forestal Centroamericana* 29: 34-38.
- Alfaro, M.M y R.V. De Camino. 2002. Melina (*Gmelina arborea*) in Central America. Forest Plantations Working Paper 20. Forest Resources Development Service. Forest Resources Division.FAO.Roma.18 p.
- Arias, A.D., Esquivel, E., Briceño, E. y Guevara, M. 2017. Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los cultivos forestales lignocelulósicos en el contexto del mecanismo de desarrollo limpio. Informe Final de Proyecto, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 61 p.
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O. y Sandoval, C. 2015. Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12 (28) 23-35.
- Badilla, y.; Murillo, O.; Azofeifa, M. y Obando, G. 2003. Avances en Reforestación Clonal en Costa Rica. En: V Congreso Forestal Nacional. 17-19 de setiembre del 2003. San José, Costa Rica.
- Balcorta, H. y 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, Serie ciencias forestales y del ambiente*. 10(1): 13-19.
- Barquero, M.E. 1987. Establecimiento de rodales semilleros de *Gmelina arborea* Roxb. Hojanca, Guanacaste. In Rojas, FE (ed.). Primer Taller Nacional de Semillas y Viveros Forestales. MEMORIA noviembre, 1985, San José, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. p.p. 141-153.
- Barrantes, G. 1999. Comercialización de semillas en el Banco de Semillas del Centro Agrícola Cantonal de Hojanca (CACH). In Segundo simposio sobre Avances en la producción de Semillas Forestales en América Latina. Santo Domingo, RD. Octubre de 1999. p. 243-248.

- Barrantes, A. R. y Ugalde, S. A. (2013). Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Oficina Nacional Forestal. Heredia, Costa Rica, 32 p.
- Castro, N.H.C.1992. Número de repetições e eficiência de seleção em progênie de meios irmãos de *Eucalyptus camaldulensis*. 121 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- Cornelius, J; Hernández, M. 1995. Variación genética en crecimiento y rectitud del fuste en *Gmelina arborea* en Costa Rica. Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales 10:9.
- Chacón, P; Murillo, O. 2005. Análisis comparativo de la producción de minijardines clonales hidropónicos y jardines clonales en tierra de melina (*Gmelina arborea* Roxb.). *Kurú: Revista Forestal* 2(6):7 p.
- Cruz, C. D. 2005. Principios de genética quantitativa. Viçosa, MG: UFV, 349 p.
- Dean, C. A., Coterril, P. P. Burdon, R. D. 2006. Early selection of radiata pine-Trends over time in additive and dominance genetic variances and covariances of growth traits. *Silvae Genetic*, Frankfurt, Vol. 55, No. 4-5, p. 182-191.
- Dvorak, W. 2003. Recent Advances with *Gmelina arborea* CAMCORE: World View of *Gmelina arborea*: Opportunities & Challenges. North Caroline State University Raleigh, NC: USA. 18 p.
- Espitia, M.; Murillo, O.; Castillo, C.; Arizmendi, H.; y Paternina, N. 2010. Ganancia genética esperada en la selección de acacia (*Acacia mangium* Willd.) en Córdoba (Colombia). *Revista U.D.C.A, Actualidad y Divulgación Científica* 13(2)99 - 107.
- Espitia, M., Murillo, O. y Castillo, C. 2016. Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia). *Revista Árvore, Universidad Federal de Viçosa (Brasil)*.
- Falconer, D. S.1987. Introdução a genética quantitativa. Viçosa, MG: UFV, 279 p.
- Hodge, G. R.; Dvorak, W.J. 2003. The CAMCORE International Provenance/Progeny Trials of *Gmelina arborea*: genetic parameters and potential gain. In *Recent Advances with Gmelina arborea* (eds. W. S. Dvorak, G.R. Hodge, W. C. Woodbridge and J. L. Romero). North Carolina State University. Raleigh, NC. US. CAMCORE. CD-ROM.

- Instituto de Estadística y Censo 2014. VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados Generales. San José, Costa Rica. 147 p.
- Indira, E. 2006. Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*. 18(1), 36-50.
- Kageyama, P. Y. 1983. Seleção precoce a diferentes idades em progênies de *Eucalyptus grandis* (hill) ex Maiden. 147 p. Tese (Livre-Docência) –Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- Kumar, A. 2007. Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Silvae Genetic*. 56, 32-36.
- Lauridsen E. B. y Kjaer E. D. 2002. Provenance research in *Gmelina arborea* Linn., Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. *Int. Forestry Rev.* 4 (1): 1–15.
- Lega, F., 1988. Estudio de la Forma de *Gmelina arborea* Roxb. Análisis de las plantaciones de Manila, Siquirres. Tesis Mg.Sc. Universidad de Costa Rica y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) 116 p.
- Marques Júnior, O. G. 1995. Estimativas dos parâmetros genéticos e fenotípicos e avaliação da eficiência da seleção precoce em *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. 69 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- Ministerio de Ambiente y Energía. 2002. El éxito forestal en Costa Rica en cinco casos. Comisión de seguimiento del plan nacional de desarrollo forestal. San José, Costa Rica.
- Moya, R. 2004. *Gmelina arborea* in Costa Rica. *Bios et Forêts Des Tropiques* 279(1): 47-57.
- Murillo, O.; Badilla, Y.; Rojas, F. 2011. Estrategia de mejoramiento genético para la cooperativa GENFORES. Ponencia magistral. En: XII Congreso Nacional Colombiano de Mejoramiento Genético de Cultivos. Montería, Córdoba, Colombia. 22-24 de junio, 2011.
- Murillo, O. y Guevara, V. 2013. Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO, San José, Costa Rica. 159 pp.

- Murillo, O.; Obando, G.; Badilla, Y. y Azofeifa, M. 2003. Creación de GENFORES, una cooperativa de mejoramiento genético forestal en Costa Rica. En: V Congreso Forestal Nacional. 17-19 de setiembre del 2003. San José, Costa Rica.
- Murillo, O.; Rojas, J. L. y Badilla, Y. 2001. Reforestación Clonal. 1era edición. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 32 p.
- Murillo, O.; Espitia, M. y Castillo, C. 2012. Fuentes Semilleras para la Producción Forestal. 1ª ed. Editorial Domar S.A.S. Bogotá, Colombia. 184 p.
- Oliveira, M. S. P. 2007. Melhoramento genético de espécies perenes nativas da Amazônia. In: Simpósio de atualização em genética e melhoramento de plantas. 2007, Lavras. Anais...Lavras: UFLA/GEN.
- Pavlotzky, B. y Murillo, O. 2012. Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en Los Chiles, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 23(1):1 - 13.
- Pires, I. E. Eficiência da seleção combinada no melhoramento genético de *Eucalyptus* spp. 1996. 116 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Resende, M.D.V. de., Murillo, G.O. y Badilla, Y. 2018. Genética cuantitativa y selección en el mejoramiento forestal. 1 Edición, Cartago, Costa Rica.304p.
- Resende, M. D. V. de. 2016. SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada. (Programa de cómputo). Brasília, BR, EMBRAPA.
- Resende, M.D.V. de 2002. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. 975p.
- Rodríguez, M. 2004. Reforestación clonal en la Costa Atlántica. En: Seminario actualización en propagación y silvicultura clonal. CONIF (ed). Bogota, Colombia.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M. 2004. Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). San José, Costa Rica. 314 pp.
- Salas G. R. 2012. Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 54 p.
- Vargas H., J. J., AND W. T. ADAMS. 1992. Age-age correlation and early selection for wood density in young coastal Douglas-Fir. *For. Sci.* 38: 467-477.

- Wee, A., LI, C., Dvorak, W. 2012. Genetic diversity in natural populations of *Gmelina arborea*, implications for breeding and conservation. *New Forests*. 43, 411-428.
- 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. sp.
- Zeaser, D. 1996. Comportamiento temprano de familias de progenies de *Melina* producido por polinización abierta entre clones de árboles plus en Huerto Semillero. III Taller Nacional Forestal y Agroforestal. Guanacaste, Costa Rica. 7 p.
- Zobel, B. y Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México D.F. 545p.
- Zobel, B y Talbert, J. 1984. *Applied Forest Tree Improvement*. John Wiley and Sons. New York, USA. 510p.

Capítulo I

Determinación de la edad de selección de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en Costa Rica

Resumen

La edad de selección temprana permite acelerar los programas de mejoramiento genético con melina (*Gmelina arborea*), la cual es la segunda especie forestal más importante para la reforestación comercial en Costa Rica. El objetivo de este trabajo fue estimar la edad de selección de melina en Costa Rica, evaluando tres ensayos genéticos, dos localizados en la zona sur de Costa Rica (El Porvenir y La Ceniza) y uno localizado en la Región Caribe (Siquirres). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones (Siquirres y El Porvenir) y seis repeticiones (La Ceniza) por tratamiento. El distanciamiento inicial fue de 4mx3m para el ensayo del El Porvenir y de 4mx4m para los ensayos de Siquirres y La Ceniza. Se calcularon parámetros genéticos a diferentes edades, para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste, utilizando el software SELEGEN, el cual se basa en el método REML/BLUP, además, se realizaron correlaciones genéticas entre las variables evaluadas. Los resultados muestran que el DAP y el volumen comercial son los caracteres con mayor control genético, presentando los mayores valores promedio de heredabilidad individual y media clonal, entre los 2.8 y 4 años de edad, que permiten definir dicho rango de edades como posible edad de selección genética. A partir los 2.8 años de edad se presentan las mayores correlaciones genéticas (>0.80%), entre las variables DAP y volumen comercial, que aumentan con edades posteriores hasta alcanzar valores mayores a 90%. Se concluye que existe potencial para la selección temprana de melina, de acuerdo con los caracteres evaluados.

Palabras clave: Heredabilidad, heredabilidad media clonal, mejoramiento genético, parámetros genéticos, correlaciones genéticas.

Determination of the selection age of *Gmelina arborea* Roxb. (melina) in Costa Rica

Abstract

The age of early selection allows to accelerate genetic improvement programs with melina (*Gmelina arborea*) which is the second most important forest species for commercial reforestation in Costa Rica. The objective of this work was to estimate the age of melina selection in Costa Rica, evaluating three genetic tests, two located in the southern part of Costa Rica (El Porvenir and La Ceniza) and one located in the Caribbean Region (Siquirres). A randomized complete block design with four replications (Siquirres and El Porvenir) and six replications (La Ceniza) per treatment was used. The spacing was 4 m x 3 m for the El Porvenir trial and 4 m x 4 m for the Siquirres and La Ceniza trials. Genetic parameters were calculated at different ages, for the variables diameter at chest height (DBH), commercial height, commercial volume and stem quality, using the SELEGEN software, which is based on the REML / BLUP method, in addition, They made genetic correlations between the evaluated variables. The results show that the DBH and the commercial volume are the characters with the highest genetic control, presenting the highest average values of individual heritability and clonal mean, between 2.8 and 4 years of age, which allow defining this age range as a possible age of genetic selection. From 2.8 years of age, the highest genetic correlations (> 80%) are presented, between the DAP variables and commercial volume, which increase with later ages until reaching values greater than 90%. It is concluded that there is potential for early melina selection, according to the evaluated characters.

Keywords: Heritability, mean heritability of the clone, genetic improvement, genetic parameters, genetic correlations.

Introducción

La melina es una de las principales especies maderables que se comercializan en Costa Rica, es utilizada para la fabricación de material de embalaje, para la construcción y fabricación de muebles (Barrantes y Ugalde, 2018). La experiencia del mejoramiento genético con melina se debe a que es fácil de reproducir, presenta rápido crecimiento y floración temprana (cortas generaciones de reproducción) y posee buena respuesta a la selección, además de presentar gran variación fenotípica combinada con una alta heredabilidad para caracteres importantes (Lauridsen y Kjaer, 2002).

El ciclo productivo de la melina es relativamente largo comparado con otras actividades productivas, por lo tanto, es fundamental reducir el tiempo para la obtención de ganancias genéticas, por ciclo de mejoramiento y aumentar la precisión en la selección genética, para las características deseadas y de esta forma la eficiencia en el proceso de selección, incrementando las ganancias genéticas en un menor tiempo y disminuyendo los costos de los programas de mejoramiento (Moraes et al., 2014). La estimación de parámetros genéticos es de gran importancia en la planificación de los programas de mejoramiento genético, que direccionan los procedimientos de selección de individuos con características de interés para el mejoramiento (Zimback et al., 2011).

La selección temprana es una estrategia a la cual recurre el genetista forestal para realizar selección de los mejores árboles, basado en alguna característica de interés económico, por lo general, el volumen comercial, aunque dicha selección se realice a una edad temprana, lo que se busca es mejorar la producción de volumen a la edad de rotación. Es recomendable estimar las correlaciones genéticas de la edad por separado, para cada carácter, especie, combinación de edad y conjunto de ambientes. El éxito de la selección a edades más tempranas, en la producción de ganancia en volumen a la edad de rotación, depende en parte de la correlación edad-edad, de las dos edades en estudio (White et al., 2007). Esta correlación es alta cuando los rangos genotípicos son estables en el tiempo y bajos cuando fluctúan sustancialmente (Rweyongeza, 2016).

El análisis de las tendencias de los parámetros genéticos a diferentes edades para los rasgos de crecimiento, como la heredabilidad y las correlaciones edad-edad, permite

predecir la edad de la selección temprana (Shu et al., 2016). Esta selección se realiza mucho antes de la edad de rotación para acortar el ciclo de reproducción y maximizar la ganancia por unidad de tiempo (Ye y Jayawickrama, 2012). La eficiencia de un programa de reproducción forestal está directamente relacionada con el tiempo requerido para obtener ganancias genéticas. Por lo tanto, la coincidencia del desempeño de las características de interés, en edades tempranas y adultas es esencial para una mayor efectividad de un programa de mejoramiento genético (Santos et al., 2014).

La edad de selección es un factor importante en un programa de mejoramiento, considerando que el tiempo es un factor determinante en la toma de decisiones, sobre todo en la actividad forestal, donde los resultados del mejoramiento son a largo plazo y el desarrollo de programas de mejoramiento es materia compleja, que requiere ser lo más eficiente posible. Para cualquier genetista forestal es clara la importancia de optimizar el tiempo demandado para realizar un ciclo de selección y, consecuentemente, promover la maximización de la ganancia genética por unidad de tiempo (Beltrame et al., 2012). Para evaluar adecuadamente la efectividad de la selección temprana y determinar con precisión la edad de selección óptima, es importante obtener una comprensión completa de las heredabilidades y de las correlaciones genéticas edad-edad, de los rasgos a diferentes edades (Chen et al., 2003).

Dentro de las principales ventajas de la selección temprana se encuentra, el establecimiento de ensayos de campo más cortos en el tiempo, mayor facilidad para la recolección de datos y mayor flexibilidad con relación a los cambios de los objetivos propuestos para el programa de mejoramiento (Dean et al., 2006). El presente estudio tiene como objetivo estimar la edad de selección de la especie melina analizando los materiales genéticos pertenecientes a la cooperativa forestal GENFORES, utilizados actualmente para el cultivo de la madera en Costa Rica.

Materiales y métodos

Se establecieron tres ensayos de melina (*Gmelina arborea*), uno ubicado en Siquirres, provincia de Limón, denominado ensayo Siquirres o sitio 1, los otros corresponden a dos ensayos localizados en Pérez Zeledón, denominados ensayo La Ceniza (sitio 2) y ensayo

El Porvenir (sitio 3), con la finalidad de obtener la información para los análisis genéticos de los clones y material testigo utilizados (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fecha de establecimiento, material genético utilizado y localización geográfica de ensayos genéticos de melina.

Ensayo genético	Fecha de establecimiento	Material genético	Latitud	Longitud
Siquirres	Junio 2010	25 clones 2 testigos	N 10°10'80,9"	W 83°57'9,7"
La Ceniza	Octubre 2013	29 clones 5 testigos	N 9°30'16.0"	W 83°68'23.9"
El Porvenir	Octubre 2010	36 clones 1 testigo	N 9°24'70.0"	W 83°54'83.8"

El sitio 1 se presenta una topografía casi plana con pendientes inferiores a 5 %, el tipo de suelo se clasifica dentro del orden Inceptisol (Mata-Chinchilla & Castro-Chinchilla, 2019). El área de estudio se ubica dentro de la zona de vida Bosque muy Húmedo Tropical, con una altitud de 97 m.s.n.m., presenta precipitaciones durante todo el año, con una precipitación media anual de 3630 mm al año. Presenta una temperatura media anual de 25.9 °C (Instituto de Desarrollo Rural, 2015). Los sitios 2 y 3, se establecieron terrenos de uso agrícola, con pendiente plana a ondulada, presentan suelos del orden Ultisol (Mata-Chinchilla y Castro Chinchilla, 2019). La temperatura promedio anual oscila entre los 24-26 °C, la precipitación media anual es de 3000-4000 mm (Instituto meteorológico Nacional, 2005) y una humedad relativa promedio de 80%, la región se localiza en la zona de vida Bosque muy Húmedo Premontano, con una altitud promedio de 700 msnm (Alfaro et al., 2013).

En el sitio 1 los clones utilizados en el ensayo de Siquirres son los que comercializa la Asociación para el Desarrollo Sostenible de la Región Atlántica (ASIREA). Uno de los testigos corresponde a plantas provenientes de semilla del Banco de Semillas del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el otro testigo proviene de semilla de rodal semillero de Hojancha, Guanacaste.

Para el caso del ensayo de La Ceniza en el sitio 2, los clones pertenecen a la Cooperativa CoopeAgri R. L., los cuales son utilizados para la reforestación comercial en la zona sur de Costa Rica, el testigo 1 proviene del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH, T₁), el testigo 2 proviene 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.

Los clones del ensayo El Porvenir (sitio 3) provinieron de la Cooperativa Genética Forestal, la cual agremia varias empresas que se dedican a la reforestación comercial con melina, el testigo utilizado proviene de rodal semillero del CATIE ubicado en El Ceibo de Buenos Aires, provincia de Puntarenas.

Diseño Experimental

Para los tres ensayos se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (seis bloques), con dos parejas de clones por bloque, a excepción del ensayo La Ceniza, donde se utilizó tres parejas. Los clones son distribuidos aleatoriamente en parejas dentro de cada bloque, con la condición de que no queden juntas, el mismo tratamiento (parejas) dentro de un mismo bloque.

La densidad inicial para el ensayo Siquirres y de La Ceniza fue de 625 árboles por hectárea (distanciamiento de 4m x 4 m), mientras que para el ensayo El Porvenir se estableció utilizando una densidad de 833 árboles por hectárea, con un distanciamiento de 4m x 3 m. Con relación a la preparación del suelo, para el caso del ensayo de Siquirres se realizó una limpieza previa del terreno que brindó las condiciones para el establecimiento de la plantación, posteriormente se realizaron limpiezas de mantenimiento. En el caso de los dos ensayos sitio 1 y sitio 2 localizados en Pérez Zeledón, la preparación del suelo consistió en una limpieza previa, quitando la vegetación existente por medio de chapeas y posterior limpieza en el punto donde se plantó cada árbol (rodajea).

Recolección y análisis de la información

Los tres ensayos fueron evaluados a diferentes edades, debido a que se plantaron en distintas fechas, estandarizando las evaluaciones de manera parcial en los tres sitios. El ensayo de Siquirres (sitio 1) fue medido a la edad de 1,5 años, 2,8 años, 4 años, 4,9 años y 5,9 años; para el caso del ensayo La Ceniza (sitio 2), se midió a los 1,5 años, 2,7 años, 3,5 años y 4,5 años, mientras que el ensayo El Porvenir (sitio 3) se contó con información de mediciones fiables a la edad de 4,5 años y 5,8 años. Para el caso del sitio 3, la información sobre mediciones antes de los 4 años fue incompleta, lo que limitó realizar correlaciones genéticas y la estimación de parámetros genéticos para las variables evaluadas. Se incorporaron las mediciones a los 4,5 y 5,8 con la finalidad de contar con más información en el análisis de las variables estudiadas, a edades superiores a los 4 años, también por el número importante de clones que conformaron dicho ensayo.

Los resultados para los caracteres cuantitativos se analizaron tomando en cuenta los valores de los parámetros genéticos de los tres ensayos en conjunto (Sitio 1, Sitio 2 y Sitio 3). Se analizó la información utilizando los siguientes rangos de edad; menor de dos años (<2), entre dos y tres años (2 - 3), entre tres y cuatro años (3 - 4) y mayor a cuatro años (>4). El análisis integrado de los tres ensayos se realizó tomando en cuenta que el comportamiento individual, mostró una tendencia similar igual al comportamiento obtenido al realizar el análisis de toda la información en su conjunto. Es claro que los coeficientes de los parámetros genéticos varían entre un ensayo y otro, sin embargo, la tendencia se mantiene al integrarlos de manera conjunta.

Se utilizaron hojas de campo y el respectivo croquis que mostraba el diseño de cada ensayo. Se midieron las variables diámetro a la altura de pecho (DAP), altura comercial y la calidad del fuste comercial, que se cuantifica con base en la calidad de las primeras cuatro trozas, con una longitud de 2,5 m cada una, donde 1 es la máxima calidad para aserrío y 4 es una troza sin valor comercial o utilizable para leña.

Análisis de datos

Para el análisis de la información se procedió a elaborar una base de datos que integra las diferentes mediciones de las variables evaluadas a cada clon y para cada uno de los ensayos. Posteriormente a partir de los datos de DAP y altura comercial se procedió a calcular el volumen comercial utilizando la siguiente ecuación (1).

$$V_c = ((D/100)^2 * (\pi/4) * (L)) * 0.65 \quad (1)$$

Donde V_c = Volumen comercial

D = Diámetro a la altura del pecho² en cm

L = Longitud en metros

Para el cálculo de la calidad del fuste se tomó en cuenta la cantidad de trozas estimadas por individuo y el valor asignado según la calificación para cada troza, para esto se utilizó 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 se corresponde a un árbol cuyo fuste cuenta con cuatro trozas.

$$\text{Calidad general} = T_1 * 0.40 + T_2 * 0.30 + T_3 * 0.20 + T_4 * 0.10 \quad (2)$$

Dónde: T_1 , T_2 , T_3 y T_4 : 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.

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

Posteriormente se procedió a conformar una base de datos en Excel, que unificara para cada clon dentro de cada bloque todas las variables evaluadas, para cada una de las mediciones realizadas para su respectivo procesamiento. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se procedió a graficar las heredabilidades (individual y media clonal), para obtener un modelo de selección temprana, que permita visualizar el comportamiento de los coeficientes de heredabilidad y establecer a partir del mismo una posible edad de selección, fundamentado en un análisis de correlaciones genéticas edad-edad, entre los caracteres evaluados.

Los análisis se realizaron utilizando el software SELEGEN, versión 2016, 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, varias plantas por parcela, el modelo estadístico se presenta en la ecuación 4.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (4)$$

Donde, y es el vector de datos, r es el vector del efecto de repetición (asumido como fijo) y sumados a la media general, g es el vector del efecto genético total (asumido como aleatorio), p es el vector de los efectos de parcela y e es el vector del término del error o residuo (aleatorio). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos (Resende, 2016). Posteriormente, se realizaron correlaciones genéticas que permitan analizar interrelaciones entre las diversas variables evaluadas, a través del modelo estadístico 102 del software SELEGEN (Resende, 2016).

Resultados

Los mayores valores de los coeficientes de heredabilidad individual en sentido amplio y heredabilidad media del clon para los caracteres evaluados se presentaron para el carácter DAP y volumen comercial, y corresponde a los ensayos de La Ceniza y Siquirres (sitio 1 y sitio 2), sin embargo, no existe un comportamiento definido en este carácter y se observa que los valores de heredabilidad varían entre los sitios evaluados y entre los rangos de edad establecidos. Si se analiza a nivel de sitio, de manera independiente a los demás, la heredabilidad individual y media clonal máxima, para los caracteres DAP y altura comercial evaluados en el ensayo de Siquirres (sitio 1), se presentan en el rango de 3-4 años, mientras que para el volumen comercial los valores máximos de heredabilidad se presentan posterior a la edad de 4 años. Con relación al ensayo de La Ceniza y El Porvenir, (sitio 2 y 3) se presentan valores máximos a partir de los cuatro años de edad para las variables evaluadas, tanto para la heredabilidad individual en sentido amplio, como para la heredabilidad media del clon (Cuadro 3).

Cuadro 3. Heredabilidad individual y heredabilidad media del clon para las variables DAP, volumen comercial y altura comercial de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica.

Diámetro a la altura del pecho (DAP)								
Edad (años)	Heredabilidad Individual				Heredabilidad Media del Clon			
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
<2	0.096	0.040		0.068	0.685	0.557		0.621
(2-3)	0.087	0.102		0.094	0.690	0.760		0.725
(3-4)	0.127	0.147		0.137	0.718	0.828		0.773
>4	0.105	0.153	0.080	0.113	0.536	0.849	0.658	0.681

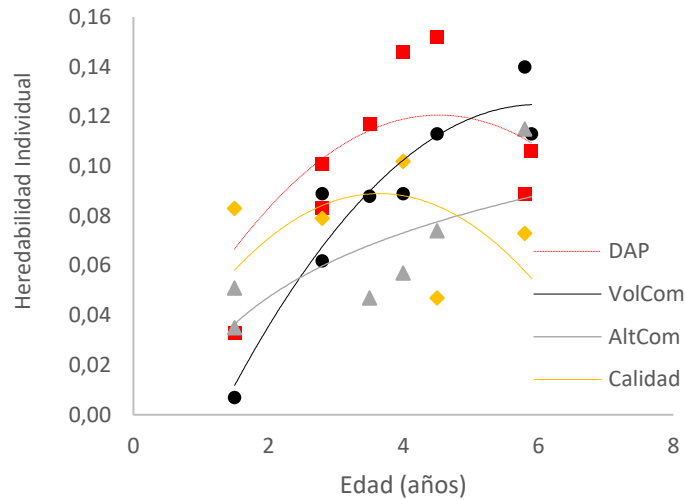
Volumen Comercial								
Edad (años)	Heredabilidad Individual				Heredabilidad Media del Clon			
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
<2	0.090	0.012		0.051	0.691	0.269		0.480
(2-3)	0.079	0.063		0.071	0.669	0.652		0.660
(3-4)	0.111	0.092		0.102	0.689	0.749		0.719
>4	0.114	0.113	0.064	0.097	0.594	0.812	0.550	0.652

Altura Comercial								
Edad (años)	Heredabilidad Individual				Heredabilidad Media del Clon			
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
<2	0.035	0.0624		0.049	0.465	0.626		0.545
(2-3)	0.034	0.035		0.035	0.461	0.505		0.483
(3-4)	0.061	0.0455		0.053	0.533	0.552		0.542
>4	0.052	0.0749	0.013	0.047	0.366	0.706	0.223	0.432

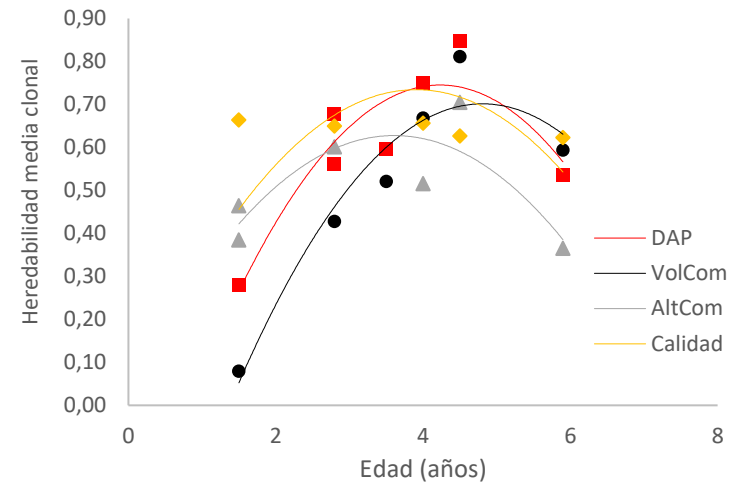
Calidad del Fuste								
Edad (años)	Heredabilidad Individual				Heredabilidad Media del Clon			
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
<2	0.083	0.011		0.047	0.664			0.664
(2-3)	0.079	0.015		0.047	0.650	0.123		0.094
(3-4)	0.102	0.047		0.074	0.657	0.141		0.399
>4	0.125		0.073	0.099	0.623	0.627	0.698	0.662

Al integrar el análisis tomando en cuenta los coeficientes de los parámetros genéticos de los caracteres cuantitativos evaluados, los mayores valores promedio por rango de edad corresponden al DAP, volumen comercial y altura comercial, con una heredabilidad en sentido amplio de 0.137, 0.102 y 0.053, respectivamente, mientras que, para la heredabilidad media del clon, los valores más altos corresponden a 0.773, 0.719 y 0.542, respectivamente, para ese mismo rango de edad (Cuadro 3). La calidad del fuste por ser una variable cualitativa se comporta de manera diferente al resto, donde los mayores coeficientes de las heredabilidades se presentan en el ensayo de Siquirres (sitio 1). Al analizar los resultados de manejo conjunta, tomando en cuenta los tres ensayos, los valores tienden a disminuir significativamente, en este caso el sitio 2, La Ceniza, se caracterizó por presentar un alto grado de bifurcación influyendo sobre los valores promedio de los coeficientes de heredabilidad individual y media del clon (Cuadro 3). De acuerdo con estos resultados se observa que los mayores valores de heredabilidad se registran para la variable DAP, esto para los diferentes rangos de edad, seguido por el volumen comercial y la altura comercial.

El comportamiento de la heredabilidad individual en sentido amplio y heredabilidad media clonal es ascendente a partir del año 1 y hasta el año 4, para las variables DAP, volumen comercial, la altura comercial y calidad del fuste (Figura 1). Los mayores coeficientes de determinación de las ecuaciones de mejor ajuste de los datos se presentan con los valores de heredabilidad media del clon, sin embargo, el comportamiento es similar para ambas heredabilidades, mostrando los valores más altos para la variable DAP, con un valor de $R^2=0.88$ y $R^2=0.85$, para heredabilidad individual y media del clon, respectivamente (Figura 1).



DAP = -0.0128x² + 0.1104x - 0.1093	R² = 0.88
VolCom = -0.0055x² + 0.0665x - 0.0754	R² = 0.90
AltCom = 0.0063x² - 0.0293x + 0.0727	R² = 0.96
Calidad = -0.0033x² + 0.0232x + 0.0516	R² = 0.44



DAP = -0.0557x ² + 0.4643x - 0.2743	R ² = 0.85
VolCom = -0.052x ² + 0.5047x - 0.5679	R ² = 0.97
AltCom = -0.0353x ² + 0.2439x + 0.1469	R ² = 0.80
Calidad = -0.002x ² + 0.0065x + 0.6559	R ² = 0.86

Figura 1. a) Comportamiento de la heredabilidad individual y b) heredabilidad media clonal, en función de la edad para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), volumen comercial (VolCom), altura comercial (AltCom), y calidad del fuste en melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica.

En el caso de la heredabilidad individual los caracteres volumen comercial y altura comercial presentan un valor de $R^2=0.90$ y 0.96 , respectivamente, mientras que la calidad del fuste refleja un valor de $R^2= 0.44$, esta variable se caracteriza por ser una variable cualitativa, que puede estar influenciada por varios factores, que, aunque podría ser de tipo genético, el manejo silvicultural puede ser determinante para efectos de influir positivamente en la calidad de la madera a obtener.

Los mayores valores para el coeficiente de determinación para la heredabilidad media del clon, varía con relación a los valores de heredabilidad individual, en este caso, el volumen comercial refleja el valor máximo, seguido de la calidad, DAP y la altura comercial, con valores de $R^2=0.97$, 0.86 , 0.85 y 0.80 , respectivamente (Figura 1).

En el ensayo de Siquirres las mayores correlaciones se presentan entre las variables DAP y volumen comercial con un valor de correlación de 0.98 , a la edad de 2.8 años, siendo esta una posible proyección de edad de selección, ya que la correlación edad-edad permite conocer que tan estable se mantiene el ranking genético de los conjuntos genéticos evaluados. Posteriormente presenta valores de correlación de 0.85 hasta los 5.9 años de edad, (Cuadro 4).

Para el ensayo La Ceniza (sitio 2), las correlaciones más altas se presentan a partir del año 2.7 de edad, para todas las variables analizadas entre sí. El comportamiento es similar al ensayo de Siquirres (sitio 1), donde el DAP y el volumen comercial a la edad de 2.7 años presentan una correlación de 0.95 mientras que el DAP y la altura comercial presentan un valor de correlación de 0.85 para el mismo rango de edad. El ensayo El Porvenir (sitio 3) presenta la mayor correlación entre las variables DAP y volumen comercial a los 4.5 años de edad (0.84), luego al correlacionar el DAP entre sí, a las edades de 4.5 y 5.8 años, se refleja una correlación de 0.95 , posteriormente, a la edad de 5.8 años, se obtuvo una correlación de 0.83 entre las el DAP y volumen comercial Cuadro 4).

Cuadro 4. Matriz de correlación de parámetros genéticos de tres ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea*) entre las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AltCom) y volumen comercial (VolCom) en Costa Rica.

Ensayo Siquirres												
Edad (años)		1.5		2.8			4			5.9		
	Variables	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom
1.5	DAP	0.69	0.95	0.87	0.25	0.83	0.69	0.41	0.66	0.57	0.27	0.50
	AltCom		0.83	0.80	0.65	0.79	0.54	0.26	0.50	0.37	0.19	0.34
	VolCom			0.90	0.39	0.89	0.67	0.42	0.66	0.53	0.28	0.49
2.8	DAP				0.44	0.98	0.79	0.49	0.78	0.65	0.38	0.62
	AltCom					0.50	0.24	0.26	0.30	-0.10	0.08	-0.02
	VolCom						0.77	0.50	0.77	0.59	0.42	0.62
4	DAP							0.59	0.94	0.81	0.43	0.74
	AltCom								0.80	0.39	0.46	0.49
	VolCom									0.75	0.46	0.72
5.9	DAP										0.36	0.85
	AltCom											0.78

Ensayo La Ceniza												
Edad (años)		1.5		2.7			3.4			4.5		
	Variables	AltCom	VolCom	DAP	Alt.Com	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom
1.5	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
2.7	DAP				0.76	0.95	0.95	0.68	0.93	0.92	0.82	0.91
	Alt.Com					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
3.4	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
4.5	DAP						0.81	0.97
	AltCom							0.84

Ensayo El Porvenir

Edad (años)	Variables	4.5		5.8		
		AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom
4.5	DAP	0.39	0.84	0.95	0.27	0.76
	AltCom		0.54	0.37	0.63	0.52
	VolCom			0.77	0.20	0.70
5.8	DAP				0.34	0.83
	AltCom					0.67

Discusión

Los valores de heredabilidad individual en sentido amplio, para el carácter DAP en melina reportados hasta ahora en términos generales son semejantes a los de este estudio, los cuales se pueden considerar bajos de acuerdo Resende y Duarte (2007), que señalan que heredabilidades de 0.01 a 0.15 son bajas, de 0.16 a 0.50 son intermedias y superiores a 0.50 son altas. Resultados para la variable DAP obtenidos por Lokmal (1994) en un ensayo de polinización abierta en Malasia, indican una $h^2g=0.12$ a la edad de 5 y 6 años, por otra parte, Hodge y Dvorak (2003), obtuvieron resultados donde el valor de heredabilidad para el DAP se mantiene relativamente constante, entre $h^2g=0.10$ y $h^2g=0.09$, a la edad de 1 año y 3 años, respectivamente, valores similares a los obtenidos en este trabajo.

Con relación a la heredabilidad media clonal, se presenta el mismo comportamiento que la heredabilidad individual, sin embargo, con valores más altos lo que presupone un mayor control genético en términos de la media a nivel de clones. La tendencia de la heredabilidad individual y media clonal, de acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes ensayos evidencian como posible rango de edad de selección genética entre los 2.8 años y 4 años, período en el cual los valores de los estimados tienden a estabilizarse. De acuerdo con Xiang (2003), el DAP puede ser un mejor predictor para la selección temprana, por tratarse de una variable que es fácil de medir y por lo tanto, los valores que se obtienen son mucho más confiables, comparados con otras variables dasométricas, como por ejemplo, la altura comercial.

La calidad del fuste es una variable que está determinada en gran medida por la altura de bifurcación (Pavlotzky & Murillo, 2014), situación que se reflejó en el sitio 2, donde los valores de heredabilidad individual y media clonal son muy bajos. La tendencia que mostraron los datos fue a aumentar los valores de los parámetros genéticos a partir de los 2,8 años hasta los 5,9 años de edad, para el caso específico de este carácter. La situación varió para cada uno de los ensayos, donde el sitio 1, Siquirres, fue el que presentó un comportamiento más estable de la heredabilidad individual y heredabilidad media clonal, dichas diferencias de comportamiento para la calidad del fuste, puede que esté relacionado con el manejo silvicultural que recibieron los ensayos, así como también por las diferencias de tipo edafoclimáticas, en el sitio 1 predominan suelos Inceptisoles, mientras que los sitios 2 y 3 se presentan suelos del

orden Ultisol, condición que aunado con el manejo y las condiciones climáticas, pueden marcar diferencias en la respuesta del crecimiento de los árboles.

Los resultados en volumen comercial para los diferentes parámetros genéticos presentan un comportamiento similar al DAP y en menor grado con la altura. Valores de heredabilidad individual en volumen comercial reportados por Wijoyo (2000), que obtuvo un valor de $h^2g=0.11$ para melina en Tailandia, a la edad de 2 y 3 años, difiere a los obtenidos en este estudio, sin embargo, analizando los valores de heredabilidad individual y media clonal obtenidos, las posibilidades de selección a partir del volumen comercial son factibles. Los resultados en términos de la heredabilidad individual en sentido amplio y heredabilidad media clonal, muestran la tendencia que permite suponer como posible edad de selección entre los dos y cuatro años de edad, con base al volumen comercial (Figura 1a y 1b).

El comportamiento de los estimados de los parámetros genéticos obtenidos en este trabajo, tienden a diferir entre los sitios evaluados, evidenciando no solamente variación a nivel genético, sino también la posible influencia de factores edáficos y climáticos, los cuales no fueron objeto de análisis en este trabajo, en vista de que se persigue conocer diferencias entre la variabilidad genética de los clones utilizados y el material testigo, así como las diferencias en el manejo silvicultural que recibieron los tres ensayos.

Estudios previos con melina, reportados por otros autores demuestran que la altura comercial puede ser una variable que funcione como predictora de la selección genética, aspecto que contrasta con los resultados obtenidos, en vista de las diferencias en los valores de los coeficientes de heredabilidad. Hodge y Dvorak (2003), determinaron en un ensayo con la especie melina heredabilidades en altura de $h^2g=0.18$ y $h^2g=0.17$ a la edad de 5 y 6 años, respectivamente. Por otra parte, Lokmal (1994) reporta valores de heredabilidad a la edad de 1, 5 y 6 años para altura, de $h^2g=0.068$, $h^2g=0.179$ y $h^2g=0.166$, respectivamente. Otros resultados reportados para melina, en la India, en un estudio con 70 clones, señala heredabilidades en sentido amplio para la altura de $h^2g=0.31$ a los 5 años de edad (Kumar, 2007). Todos estos resultados se obtuvieron en plantaciones forestales localizadas en regiones donde la melina es nativa, aspecto que pudo influir en los resultados, en vista de que a pesar de que la especie crece bien en el trópico, existen factores asociados que

también influyen en el crecimiento de la especie, lo que puede explicar las diferencias en los valores de los coeficientes de heredabilidad obtenidos para la variable altura, sin embargo, la altura comercial como variable de selección, se evidencia mejor en términos de la tendencia de la heredabilidad media del clon, entre los 2 años y 4 años de edad donde se reflejan los mayores valores para este carácter (Figura 1a y 1b).

Los valores de las correlaciones genéticas obtenidos en los tres ensayos para los caracteres diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AltCom) y volumen comercial (VolCom), permiten conocer el potencial de la selección temprana de los materiales genéticos utilizados. Las correlaciones entre el DAP y volumen comercial a diferentes edades permitieron obtener valores de correlación mayores a 0.73, a partir de los 4 años de edad, aunque para el sitio 1 y 2, los mayores valores de correlación entre los caracteres evaluados se presentaron a partir de la edad de 2,7 y 2,8 años, respectivamente, con valores altos de correlación para DAP y volumen comercial (>0.95), estos valores coinciden con lo que menciona Zimback et al. (2011), quienes mencionan que en trabajos similares de asociación genética en especies forestales se han presentado altos valores de correlación genética entre esos caracteres a edades similares.

En el ensayo de Siquirres a edades inferiores a 4 años la correlación de los caracteres entre sí y con las otras características no semejantes mostraron valores bajos ($<60\%$) y en algunos casos inversos (correlaciones negativas), específicamente la altura comercial (AltCom) mostró correlaciones muy bajas con el DAP y el volumen comercial (VolCom), en los tres ensayos evaluados. El sitio 2 a la edad de 1,5 y 4,5 años, se presenta valores de correlaciones superiores a 0.70 y 0.80, respectivamente, entre las variables DAP y volumen comercial, principalmente, evidenciando el potencial de selección genética a temprana edad. Los valores de correlación obtenidos son congruentes con el análisis de las heredabilidades, que evidencian la tendencia que indica las posibilidades de selección genética entre los 2,8 y 4 años de edad. La selección temprana al ser una selección indirecta que se puede realizar mediante correlaciones genéticas, las cuales deben ser confiables, permiten su aplicación en la reproducción operativa (Rweyongeza, 2016).

Las diferencias obtenidas en las estimaciones de los parámetros genéticos de los caracteres evaluados en este estudio, así como también entre las correlaciones

genéticas, se explican si se toma en cuenta que las condiciones de clima y a nivel de suelo pueden influir en dichos resultados. Se ha demostrado que los parámetros genéticos y las correlaciones de edad - edad difieren entre sitios o regiones geográficas (Gwaze et al., 2000; Weng et al., 2007), sin embargo, a pesar de las diferencias obtenidas en los coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, así como en los demás parámetros genéticos, con el análisis integrado de los tres ensayos evaluados, la tendencia en el comportamiento de la especie se mantiene en los tres sitios, a partir del cual fue posible proyectar la edad de selección.

Conclusiones

El DAP y el volumen comercial son los caracteres con mayor control genético, mostrando a la vez los mayores valores promedio de heredabilidad individual y media clonal, que respaldados con los valores de correlación de los parámetros genéticos permiten definir el rango de edad entre 2.5 – 3.5 años como la edad óptima de selección genética. Las mayores correlaciones genéticas se presentan entre las variables DAP y volumen comercial a partir los 2.7 años de edad (>0.80) que aumentan con edades posteriores hasta alcanzar valores mayores a 90%, lo que permite suponer el potencial de selección temprana con base a los caracteres analizados.

Referencias bibliográficas

- Barrantes R. A., Ugalde A. S. 2017. Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Oficina Nacional Forestal, San José, Costa Rica, 38 p. Recuperado de <https://onfcr.org/media/uploads/documents/usos-y-aportes-de-la-madera-2017.pdf>
- Beltrame, R., Bisognin, D.A., Mattos, B.D., Cargnelutti Filho, A., Haselein, C.R., Gatto, D.A., y Santos, G.A. 2012. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(6), 791–796. Doi:10.1590/S0100-204X2012000600009
- Chen X., Hawkins, B., Xie, C.Y., & Ying, C.C. 2003. Age trends in genetic parameters and early selection of lodge-pole pine provenance with particular reference to the Lambeth model. *Forest Genetic* 10(3), 249–258. Recuperado de https://kf.tuzvo.sk/sites/default/files/FG10-3_249-258.pdf

- Dean, C.A., Coterril, P. P., & Burdon, R. D. 2006. Early selection of radiata pine-Trends over time in additive and dominance genetic variances and covariances of growth traits. *Silvae Genetica*, 55(4-5), 182-191. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286222116_Early_selection_of_radiata_pine_I_Trends_over_time_in_additive_and_dominance_genetic_variances_and_covariances_of_growth_traits
- Gwaze, D.P., Bridgwater, P.E., Byram, T.D., Woolliams, J.A. & Williams, C.G. 2000. Predicting age-age genetic correlations in tree-breeding programs: a case study of *Pinus taeda* L. *Theoretical and Applied Genetics* 100(2), 199–206. Doi: 10.1007/s001220050027
- Hodge, G. R., & Dvorak, W. S. 2003. The CAMCORE International Provenance/Progeny Trials of *Gmelina arborea*: Genetic Parameters and Potential Gain. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FB%3ANEFO.0000040942.34566.a7.pdf>
- Kumar, A. 2007. Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Silvae Genetica*, 56(6), 32–36. Doi: 10.1515/sg-2007-0005
- Lauridsen E.B., & Kjaer E. D. 2002. Provenance research in *Gmelina arborea* Linn. Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. *International Forestry Rev* 4(1), 1–15. Recuperado de <https://ign.ku.dk/english/research/forest-nature-biomass/forest-genetics-diversity/gmelina-arborea-trials/filer/gmelina-article.pdf>
- Lokmal, N. 1994. Genetic parameters of *Gmelina arborea*: height and diameter growth. *Journal of Tropical Forest Science* 7(2), 323–331. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/240610968_GENETIC_PARAMETERS_OF_GMELINA_ARBOREA_HEIGHT_AND_DIAMETER_GROWTH/download
- Moraes, C. B., Brizolla, F. T, Teixeira, G. L., Zimback, L., Tamburussis, E. V., Chaves, R., ...Mori, S. E. 2014. Estimates of genetic parameters for selection of trees in *Eucalyptus*. *Journal Scientia. Forestalis*, 42(104), 623–629. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286618729_Estimates_of_genetic_parameters_for_selection_of_trees_in_Eucalyptus
- 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. Recuperado de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v28n01_047.pdf

- Pavlotzky, B. & Murillo, O. 2014. Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 38(2), 7–17. Recuperado de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v38n02_007.pdf
- Resende, M.D.V. 2016. Software SELEGEN-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16, 330–339. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Resende, M.D.V., Duarte, J.B. 2007. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.37, n.3, p. 182-194, 2007.
- Rweyongeza, D. M. 2016. A new approach to prediction of the age-age correlation for use in tree breeding. *Annals of Forest Science*, 73(4),1099–1111. Doi: [10.1007/s13595-016-0570-5](https://doi.org/10.1007/s13595-016-0570-5)
- Santos, A. M., Rosado, S.C.S. & Oliveira, A. N. 2014. Estimation of genetic parameters and verification of early selection efficiency in Baru (*Dipteryx alata*) *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14(4), 238-243. Doi: [10.1590/1984-70332014v14n4a37](https://doi.org/10.1590/1984-70332014v14n4a37)
- Shu D, Hou Y, Xie Y., & Sun X. 2016. Age trends of genetic parameters, early selection and family by site interactions for growth traits in *Larix kaempferi*, open-pollinated families. *BMC Genetic* 17(1), 104–115. Doi: [10.1186/s12863-016-0400-7](https://doi.org/10.1186/s12863-016-0400-7)
- Weng, Y.H., Tosh, K.J., Park Y.S. & Fullarton M.S. 2007. Age-related trends in genetic parameters for Jack Pine and their implications for early selection. *Silvae Genetica* 56(5), 242-251. Doi: <https://doi.org/10.1515/sg-2007-0035>
- Wijoyo, F. S. 2000. A study of genetic parameters of *Gmelina arborea* Roxb. From Thailand grown in 5 countries. College of Natural Resources, North Carolina State University. Raleigh, NC. 27695. USA.101 p.
- White, T. L., Adams W. T., & Neale D. B. 2007. *Forest Genetics*. CABI. Oxfordshire. 682 p. ISBN 978 0 85199 083 5
- Xiang, B., Li, B., & Isik, F. 2003. Time trend of genetic parameters in growth traits of *Pinus taeda* L. *Silvae Genetica*, 52(3–4), 114–20. Recuperado de https://pdfs.semanticscholar.org/c1c7/93ccddfc0a90ce3d69f1f0eeeea2654a8b3a8.pdf?_ga=2.49432166.1709924412.1563383584-2042927797.1563383584

Ye, T., Jayawickrama, K. 2012. Early selection for improving volume growth in coastal Douglas-fir breeding programs. *Silvae Genetica*, 61(1-6) 186–198. Doi: 10.1515/sg-2012-0024

Zimback, L., Mori, E. S., Brizolla, T. F., Chaves, R. 2011. Correlações entre caracteres silviculturais durante o crescimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista do Instituto Florestal*, São Paulo 23(1), 57–67. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/259828934_CORRELACOES_ENTRE_CARACTERES_SILVICULTURAIIS_DURANTE_O_CRESCIMENTO_DE_Eucalyptus_grandis_Hill_ex_Maiden

Capítulo II

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

Resumen

La *Gmelina arborea* (melina) es una especie forestal que se ha consolidado como la segunda especie exótica más utilizada en Costa Rica, principalmente por la versatilidad de su madera, fácil trabajabilidad, adaptación a diversas condiciones de sitio y rápido crecimiento. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de clones *G. arborea* en condiciones de suelo ácidos. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con seis repeticiones, 29 clones y cinco testigos, con un distanciamiento de 4 m x 4m. Se realizó un análisis del suelo, para conocer las características físicas y químicas del suelo. 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, además, se realizaron correlaciones genéticas entre las variables evaluadas. Los resultados del análisis del suelo reflejaron deficiencias nutricionales a nivel de varios elementos esenciales para el desarrollo de la melina, así como un pH menor a 5.5, altos contenidos de hierro (Fe) y saturación de aluminio (Al) elevado. Con relación a los parámetros genéticos los resultados obtenidos reflejan que los mayores coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon se presentan a la edad de 4.5 años, donde el DAP es el carácter que presentó mayores valores. Las correlaciones genéticas reflejan altos porcentajes de correlación a partir de los 3.5 años, entre las variables DAP-volumen comercial. Con base al ranking genético, se evidencian 10 clones que se comportan como los que mejor se adaptaron a las condiciones de 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. Se concluye que existe material genético con potencial para adaptarse a condiciones de suelos con características limitantes.

Palabras clave: parámetros genéticos, mejoramiento genético, suelos ácidos, ganancia genética.

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

Abstract

Gmelina arborea (melina) is a forest species that has established itself as the second most widely used exotic species in Costa Rica, mainly due to the versatility of its wood, easy workability, adaptation to various site conditions and rapid growth. The present work aims to evaluate the behavior of *G. arborea* clones under extreme site conditions. A randomized complete block experimental design was used, with six replications, 29 clones and five controls, with a distance of 4m x 4m. An analysis of the soil was carried out, to know the physical and chemical characteristics of the soil. Genetic parameters were calculated at different ages, for the variables diameter at chest height (DBH), height and commercial volume, using the SELEGEN software, which is based on the REML / BLUP method, in addition, genetic correlations were made between the variables evaluated. The results of the soil analysis reflected nutritional deficiencies at the level of several essential elements for the development of melina, as well as a pH lower than 5.5, high iron (Fe) contents and high aluminum (Al) saturation. Regarding the genetic parameters, the results obtained reflect that the highest coefficients of individual heritability and average heritability of the clone are presented at the age of 4.5 years, where DBH is the character that presented the highest values. Genetic correlations reflect high correlation percentages after 3.5 years, between the DAP-trade volume variables. Based on the genetic ranking, 10 clones are shown that behave as those that best adapted to the site conditions, presenting higher growths in the dasometric variables, with genetic gains in the range of 12.7% and 28%, compared to the mean general of the test and the material used as control. It is concluded that there is genetic material with the potential to adapt to soil conditions with limiting characteristics.

Key words: genetic parameters, genetic improvement, acid soils, genetic gain.

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 los años 90's, con el establecimiento de proyectos de reforestación a mayor escala, coincidiendo con los primeros programas de mejoramiento genético de la especie (Murillo, 1992, Zeaser, 1998, Badilla y Murillo, 2011).

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 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 lo que impulsó a la vez el establecimiento de programas de mejoramiento genético con la especie, que permitió obtener mayores rendimientos, a un menor costo y en el menor tiempo posible.

La especie se desarrolla principalmente 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, de poca pendiente y con baja humedad (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 que crece mejor en zonas bajas en donde existe acumulación de nutrientes, suelos bien drenados. Reitera a la vez, que esta especie no crece bien en suelos pobres, secos e inundados, es decir, que no soporta suelos con factores limitantes extremos.

En general se recomienda que los contenidos de calcio y magnesio deben ser mayores de 10 a 6 miliequivalentes por cien mililitros de suelo (meq/100ml 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).

Por lo tanto, 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, 2010). La variación entre clones se usa comúnmente como una estimación de la variación genética total y 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 limitantes para el desarrollo de la especie.

Materiales y Métodos

Localización del área de estudio

El área de estudio se localizó en la zona sur de Costa Rica, específicamente en Pérez Zeledón. 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" W, 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 3000-4000 mm (IMN, 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).

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 testigo 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, consistió en rodajea durante los primeros 6 meses de edad, posteriormente se realizaron 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 dos 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 (GENFORES) y constituyen el material genético utilizado por las empresas, en proyectos de reforestación comercial con melina en Costa Rica.

Se realizó un análisis físico - químico 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, utilizando la solución extractora KCL-Olsen modificado para la determinación de los diferentes metales. La determinación del pH se realizó en agua y el porcentaje de

Carbono (C) y Nitrógeno (N) totales se determinaron con el autoanalizador de C/N por combustión seca. La estimación del porcentaje de materia orgánica total se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ M.O.} = \% \text{ C} * 1.43$$

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

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 Penetrologger de Eijkelkamp con el cono uno. El terreno se caracteriza por ser en su mayor parte plana, con pendientes menores al 5%, a excepción del bloque VI donde existen una leve ondulación con pendientes no mayores a 15%. . Previo a la siembra se realizó una limpieza del terreno para eliminar arbustos y otro tipo de árboles presentes en sitio, de manera que el área de siembra quedará lo más homogénea posible.

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. Para el levantamiento de la información se utilizó formularios de campo, que reunía la información necesaria para realizar las diferentes mediciones, además del respectivo diseño del ensayo, con la distribución de los clones y testigos en cada uno de los bloques. En el formulario de campo 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 ó 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, Meza & Cabrera, (2004). La ecuación 1 permite calcular la calidad global del árbol tomando en cuenta el aporte individual de cada troza; en ese caso se corresponde a un árbol cuyo fuste cuenta con cuatro trozas.

$$\text{Calidad general} = T1 * 0.40 + T2 * 0.30 + T3 * 0.20 + T4 * 0.10 \quad (1)$$

Dónde: $T1$, $T2$, $T3$ 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 2.

$$\text{Calidad (\%)} = 100 * [1 - ((\text{calidad general} - 1) / 3)] \quad (2)$$

A partir de los datos de DAP y altura comercial se procedió a calcular el volumen comercial utilizando la siguiente ecuación (3).

$$V_c = ((D/100)^2 * (\pi/4) * (L)) * 0.65 \quad (3)$$

Donde V_c = Volumen comercial

D = Diámetro a la altura del pecho² en cm

L = Altura comercial en metros

Posteriormente, se procedió a conformar una base de datos en Excel, que unificara para cada clon dentro de cada bloque todas las variables evaluadas, para cada una de las mediciones realizadas para su posterior procesamiento.

Análisis Estadístico

Los análisis genéticos se realizaron utilizando el software SELEGEN, versión 2016, 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, varias plantas por parcela, el modelo estadístico se presenta en la ecuación 4.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (4)$$

Donde, y es el vector de datos, r es el vector del efecto de repetición (asumido como fijo) y sumados a la media general, g es el vector del efecto genético total (asumido como aleatorio), p es el vector de los efectos de parcela y e es el vector del término del error o residuo (aleatorio). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos (Resende, 2016). Posteriormente, se realizaron correlaciones genéticas que permitan analizar interrelaciones entre las diversas

variables evaluadas, a través del modelo estadístico 102 del software SELEGEN (Resende, 2016). El porcentaje de la ganancia genética se determinó con base al ranking genético que el software SELEGEN emite para cada análisis genético por carácter, utilizando el valor de ganancia genética que “arroja” el programa y comparándolo con la media general de la población, que también ofrece los resultados del análisis realizado por SELEGEN.

Resultados

Características físico - químicas del suelo

El suelo se clasifica dentro del orden Ultisol, con una textura arcillosa, y 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 2).

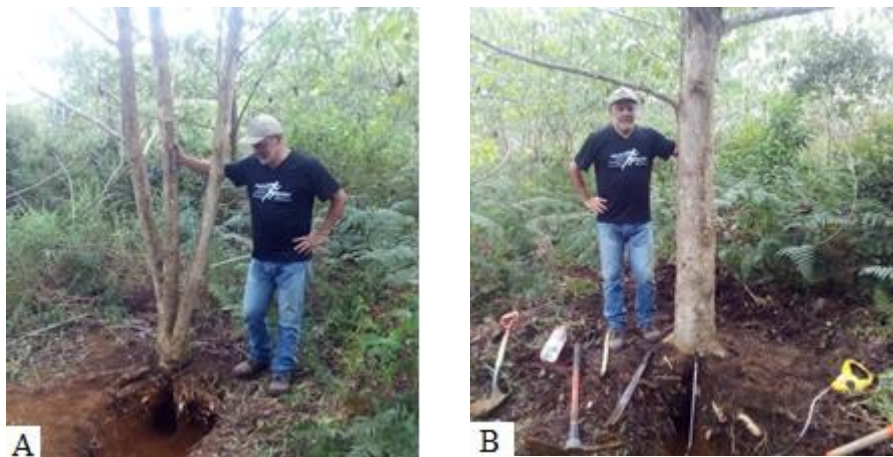


Figura 2. A. Clon de *Gmelina arborea* con comportamiento arbustivo y B. Clon de *Gmelina arborea* de buena forma en sitio marginal, La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica, 2019.

El análisis del suelo reflejó deficiencia en algunos elementos como el Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn); a la vez se evidencia 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 los valores de los elementos tienden a disminuir, explicado probablemente por la presencia de materia orgánica presente en el primer horizonte del suelo, el cual es de 6.5 % en los primeros 20 cm y de 3.3 % de 20-40 cm (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis químico de suelo, finca La Ceniza, Pérez Zeledón, Costa Rica.

Profundidad (cm)	pH (agua)	cmol(+)/L						CICE	%	mg/L				
		Acidez	Al	Ca	Mg	K	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 - 20cm y de 122 mg/L de 20 - 40 cm. En cuanto a la saturación de Aluminio el porcentaje es elevado en ambas profundidades con porcentajes de 58% y 35%, respectivamente. 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, respectivamente, a una profundidad de 0-20 cm. En el caso de la relación Ca/K, está dentro del rango óptimo de relación entre las bases, entre ambas profundidades analizadas (Cuadro 5).

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 conforme aumenta la edad presenta mayores valores de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, comparado con las otras variables; alcanzando 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 6).

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, mostrando 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, con valores de 0.075 y 0.706 de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, respectivamente, (Cuadro 6).

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 6).

Se observa, además, coeficientes de variación genética altos ($>10\%$) en las diferentes edades, principalmente para el DAP como 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 6).

Cuadro 6. 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.

Parámetros genéticos para el carácter diámetro a la altura del pecho (DAP)				
Edad (años)	H ² _i	H ² _{mc}	CVg%	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 el carácter altura comercial				
Edad (años)	H ² _i	H ² _{mc}	CVg%	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 el carácter volumen comercial				
Edad (años)	H ² _i	H ² _{mc}	CVg%	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

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 de los parámetros genéticos, 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 7).

El comportamiento de las correlaciones entre las distintas variables como es de esperar, los mayores valores se presentan entre el DAP-VolCom, donde la mayor correlación entre ambas variables se refleja 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. Para 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 los esperado (Cuadro 7).

Cuadro 7. Matriz de correlación de parámetros genéticos 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.

Ensayo La Ceniza													
Edad (años)	Variables	1.5			2.8			3.5			4.5		
		AltCom	VolCom	DAP	Alt.Com	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	
1.5	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	
2.8	DAP				0.76	0.95	0.95	0.68	0.93	0.92	0.82	0.91	
	Alt.Com					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	
3.5	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	
4.5	DAP										0.81	0.97	
	AltCom											0.84	

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 3).

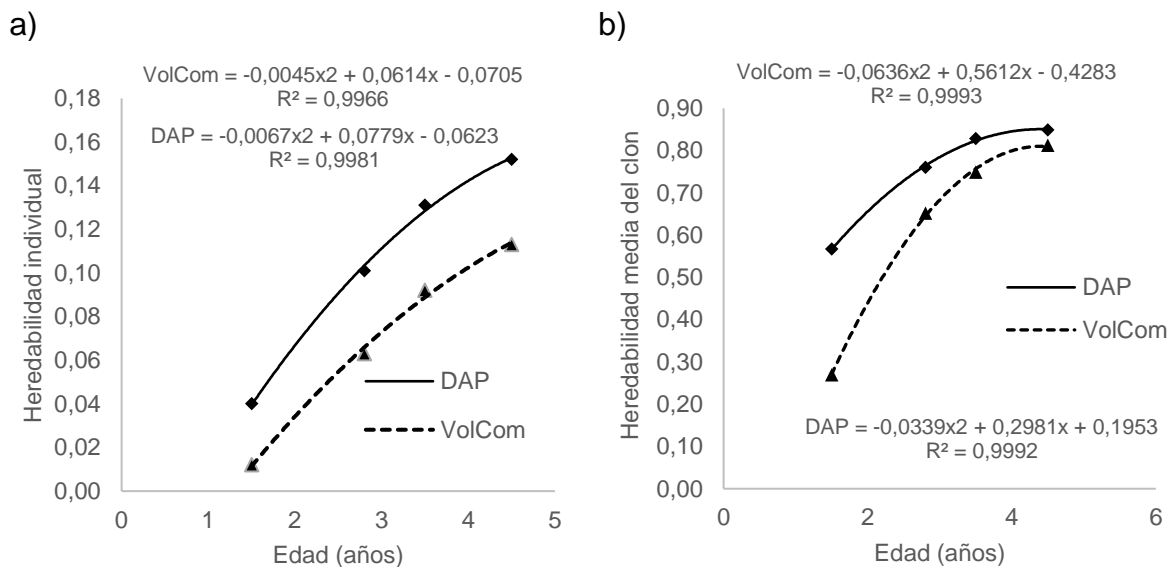


Figura 3. a) Comportamiento de la heredabilidad individual, y b) comportamiento de la heredabilidad media clonal, en función de la edad para la variable DAP y volumen comercial (VolCom) en Pérez Zeledón, Pacífico Sur de Costa Rica.

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, que corresponde 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 ($0,0398 \text{ m}^3$) 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) obtenemos que la ganancia genética respecto a los primeros 10 genotipos del ranking sería de 28%, y en contraste con el genotipo que ocupa el primer lugar en dicho ranking la ganancia genética sería de 40% en el volumen comercial (Figura 4).

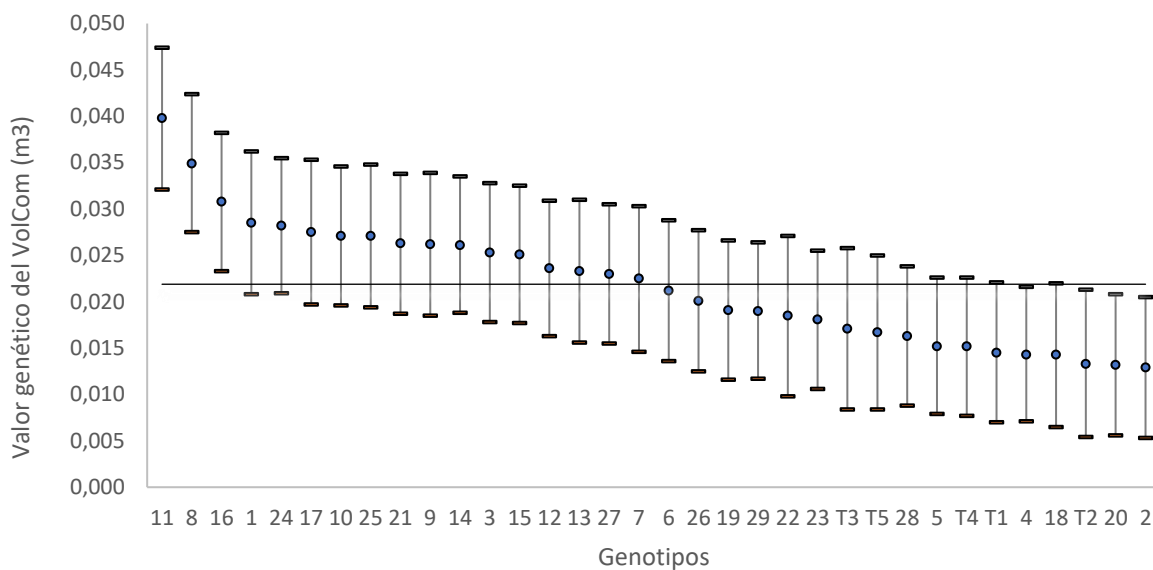


Figura 4. Ranking del valor genético del volumen comercial (m³) estimado a los 4.5 años para 34 genotipos de melina (*Gmelina arborea*) en Pérez Zeledón, Pacífico Sur de Costa Rica.

El ranking genético para el volumen comercial muestra un número importante de clones relativamente estables, localizados en los dos primeros grupos, que muestran 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 16, 10, 11, 1, 24, 21 y el clon 8 (Figura 5).

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 3); tal es el caso de los clones 9, 27, 19, 13, 23, 22 que pasaron de las primeras posiciones a otras intermedias o últimas del ranking, por otro lado, los clones 17, 3, 25, 14, 9, 12 y el clon 15 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 5).

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

Discusión

Características físico - químicas del suelo

El análisis genético permitió conocer el comportamiento del material genético de la melina en condiciones de suelo bastante ácidos, y de acuerdo con el análisis físico – químico 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 y 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, las condiciones de acidez recrudecen, 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 por considerar 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, está relacionado con la compactación, el cual es bastante alto, generando una especie de barrera que impide el desarrollo adecuado del sistema radicular de los árboles, 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; Vázquez y Ugalde 1995; Vallejos 1996).

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 los árboles, lo que permite suponer el desarrollo normal de los procesos bioquímicos y fisiológicos de la planta. En cuanto a la relación C/N, la cual 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, indicando a la vez una posible limitación de N, con las consecuencias que esta condición genera en el desarrollo de las plantas.

Estimación de parámetros genéticos

La heredabilidad individual y la heredabilidad media del clon, es uno de los parámetros genéticos que permite 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, pero superiores a la altura comercial. La tendencia de las heredabilidades del DAP y volumen comercial es 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, las posibilidades de selección a partir del DAP y volumen comercial es factible. De acuerdo con los estimados de los

parámetros genéticos obtenidos la edad de selección donde se manifiesta el mayor potencial genético de los clones evaluados es a partir de los 4.5 años, concordando con los mayores porcentajes de precisión, que en conjunto garantizan una selección genética más eficiente (Pastrana, Espítia y Murillo 2012). Resultados similares se han obtenido en otras especies como *Pinus radiata* (Cotterill y Dean, 1988; Haapanen, 2001, Dean y Stonecypher, 2006).

El comportamiento que muestran los valores correspondientes a los coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, reflejan el potencial genético del material genético, 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 y, por lo tanto, la selección genética con base en estas características posibilitara las ganancias genéticas.

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. Las correlaciones DAP-AltCom reflejan valores de correlación relativamente altos (>0.70), pero inferiores a los obtenidos entre DAP-VolCom. De acuerdo con Dong (2018), 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 medidos a diferentes edades, permiten suponer que tan estable se mantiene el ranking genético y a la vez coinciden con el comportamiento de los parámetros genéticos obtenidos, que permiten definir con mayor precisión la selección genética y, por lo tanto, la edad optima de selección (Chen et al., 2003), siendo esta una de las aplicaciones prácticas de las correlaciones genéticas edad-edad, ampliamente utilizada en los programas de mejoramiento genético (Atwood et al., 2002).

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, indicando la posibilidad de seleccionar material dentro de este grupo de individuos, buscando obtener mayores ganancias genéticas. No obstante, 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 puede aumentar hasta un 28%.

Lo anterior presupone que existen un grupo de clones que se adaptan a condiciones de suelo que normalmente son indicadas como limitantes para la melina y que consecuentemente pueden 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 un grupo de 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 el 1.5 años y hasta los 4.5 años de edad se mantienen prácticamente dentro de las mismas posiciones, algunos con variaciones relativamente bajas. Otros clones, se caracterizan por localizarse en el grupo de los de bajo rendimiento, los cuales, de acuerdo con los resultados, no se recomienda utilizar para plantar en sitios con características edáficas como las presentes en el ensayo.

Conclusiones

El sitio de plantación presenta características físico-químicas 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 tiene el material utilizado, se evidencia una clara adaptación de siete genotipos que se mantienen dentro de los primeros 10 individuos 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 que presentaron 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 no 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.

Referencias bibliográficas

- 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. y 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. and Dean, C. A. 1988: Changes in genetic control of growth of radiata pine to 16 years and efficiencies of early selection. *Silvae Genetic*. 37: 138 –146.
- Chen, X. Y., B. Hawkins, C. Y. Xie and C. C. Ying. 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. and Stonecypher R. W. 2006. Early selection of Douglas-fir across south central coastal Oregon, USA. *Silvae Genetic* 55: 135 –141.
- Foster, G.S., Shaw, D.V. 1988. Using clonal replicates to explore genetic variation in a perennial plant species. *Theor Appl Genet*, 76: 788–794.
- Haapanen, M. 2001: Time trends in genetic parameter estimates and selection efficiency for Scots pine in relation to field testing method. *Forest Genetic*. 8: 129 –144.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR). 2005. Atlas Climatológico de Costa Rica. Ministerio del Ambiente y Energía, San José, Costa Rica. Disponible en: <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, 112 p.
- Kumar, A., Luna, R. K., Parveen, K. V. 2010. Variability in growth characteristics for different genotypes of *Eucalyptus tereticornis* (SM.). *Journal of Forestry Research*. N. 21 (4):87-491. Doi: 10.1007/s11676-010-0103-2

- Molina, E., Alvarado, A. 2012. Manejo de la acidez y encalado del suelo. In Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales, ed por A. Alvarado y J. Raigosa. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. p.
- Moya, R. 2004. *Gmelina arborea* en Costa Rica. Bois et Forest Des Tropiques. N. 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° 181. 3-7 p.
- 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, v.11, n.3, p.51-58.
- Murillo, O., Meza, A., y 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
- 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. Cartago. 110 p.
- Padua, F. 2004. Juvenile selection of *Gmelina arborea* clones in the Philippines. New Forest, 28, 195-200.
<http://dx.doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040946.46722.1c>
- Pastrana, I., Espítia, M., y 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. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M. 2004. Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). San José, Costa Rica. 314 p.
- Stuhrmann, M.; Bergmann, C. and 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.

- Vallejos, O. 1996. Productividad y relaciones de índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica. 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° 256. CATIE. Costa Rica. 40 p.
- 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. <http://dx.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. San José, Costa Rica.

Capítulo III

Variación y control genético de madera de *Gmelina arborea* Roxb. (melina), proveniente de una plantación de 3.5 años de edad en la zona Atlántica de Costa Rica

Resumen

La predicción del potencial genético de materiales con características superiores y la respuesta de la selección, requiere del conocimiento de parámetros genéticos de caracteres de selección importantes. Este estudio tiene como objetivo la determinación de parámetros genéticos de las propiedades físico-mecánicas de la madera de melina (*Gmelina arborea*). Se recolectaron muestras de madera de 55 árboles (clones y testigos) provenientes de dos ensayos genéticos de melina, con una edad de tres años, las muestras fueron ordenadas por clon y se recolectó una muestra de la base (disco 1) y otra a los 5 metros a lo largo del fuste (disco 2), a la vez se generó un código para las muestras de cada clon para determinar las propiedades físico-mecánicas. Posteriormente, se calcularon parámetros genéticos para las variables analizadas utilizando el software SELEGEN, el cual se basa en el método REML/BLUP. Los resultados muestran que hay diferencias entre los porcentajes de duramen y albura entre el material clonal y el testigo. El análisis de los parámetros genéticos mostró que las variables que presentaron los mayores valores de heredabilidad son peso específico, densidad verde y contracción volumétrica. Se determinó un contenido de humedad promedio de 123%, el análisis de la densidad verde mostro un valor promedio de 0.94 g/cm³, mientras que el peso específico básico presentó un valor promedio de 0.43. Con relación a las contracciones, se obtuvo valores promedio de contracción volumétrica de 5.84%, de contracción radial de 1.67% y de contracción tangencial de 1.47%. Se concluye que existen clones con características físico mecánicas superiores que reflejan una estabilidad dimensional favorable, a la vez se refleja el potencial genético de los conjuntos genéticos evaluados.

Palabras clave: Propiedades de la madera, peso específico, control genético, mejoramiento genético.

Variation and genetic control of wood *Gmelina arborea* Roxb. (melina), from a 3.5-year-old plantation in the Atlantic zone of Costa Rica

Abstract

Predicting the genetic potential of materials with superior characteristics and the selection response requires knowledge of the genetic parameters of important selection characters. This study aims to determine genetic parameters of the physical-mechanical properties of melina wood (*Gmelina arborea*). Wood samples were collected from 55 clones from two genetic tests for melina, with an age of three years, the samples were ordered by clone and one sample was collected from the base (disk 1) and another at 5 meters along of the shaft (disk 2), at the same time a code was generated for the samples of each clone to determine the physical-mechanical properties. Subsequently, genetic parameters were calculated for the analyzed variables using the SELEGEN software, which is based on the REML / BLUP method. The results show that there are differences between the percentages of heartwood and sapwood between the clonal material and the control. The analysis of the genetic parameters showed that the variables that presented the highest heritability values are specific weight, green density and volumetric contraction. An average moisture content of 123% was determined, the analysis of the green density showed an average value of 0.94 g / cm³, while the basic specific weight presented an average value of 0.43. Regarding contractions, average values of volumetric contraction of 5.84%, radial contraction of 1.67% and tangential contraction of 1.47% were obtained. It is concluded that there are clones with superior physical-mechanical characteristics that reflect favorable dimensional stability, while reflecting the genetic potential of the evaluated genetic assemblies.

Key words: Wood properties, specific weight, genetic control, genetic improvement.

Introducción

La melina es una de las especies forestales más utilizadas en la reforestación comercial en Costa Rica; desde su introducción al país a mediados de los años 70 se fue consolidando como una de las especies más cotizadas en el mercado nacional, principalmente por las bondades de la madera, que se caracteriza por ser de fácil trabajabilidad, por su gran versatilidad para diferentes usos y su durabilidad que aunado a su rápido crecimiento en plantación o en sistemas agroforestales y silvopastoriles, permiten catalogarla como una de las especies de mayor utilización para la inversión en proyectos de reforestación comercial.

El avance en el desarrollo de paquetes tecnológicos que, con el desarrollo de los programas de mejoramiento genético de la especie a nivel nacional (Murillo 1992, Zeaser 1998, Badilla y Murillo, 2011), ha generado mayores rendimientos por unidad de producción. En la actualidad la investigación desarrollada con material genéticamente superior, se ha enfocado en estimar los rendimientos en plantación, con sistemas intensivos de producción de madera de mejor calidad, sin embargo, existen vacíos de información en aspectos diversos, como el de las propiedades físico-mecánicas de la madera, que a pesar de que hay estudios previos, las áreas a investigar en este tema son muy amplias y están muy influenciadas por varios factores, tales como, la edad de la plantación, condiciones de sitio, diferencias entre árboles de diferentes clones y dentro de las plantaciones, así como la variación a lo largo y dentro del fuste.

Las propiedades físicas permiten caracterizar una determinada especie maderable, lo cual facilita la comparación y selección entre diferentes maderas para un producto específico. Entre estas propiedades se pueden mencionar: densidad, peso específico, contracción radial, tangencial y volumétrica, punto de saturación de la fibra (PSF) y contenido de humedad (CH) (Moya, 2001) las cuales determinan la estabilidad dimensional de la madera a la hora del secado, aserrío y uso final.

Es importante conocer el efecto de los materiales genéticos utilizados (clones) sobre las propiedades físico-mecánicas, con la finalidad de seleccionar el material que mejor se comporte en términos de sus parámetros genéticos para cada uno de los caracteres evaluados.

Algunas investigaciones con especies del género *Eucalyptus* han sido desarrolladas con el fin de determinar coeficientes de heredabilidad, de parámetros de la madera tales como densidad básica, relación albura/duramen, gravedad específica, comprensión paralela y flexión estática entre otros (Santos, et al., 2004, Santos, et al., 2003, Hung, et al., 2014), los cuales en su mayoría están basados en ensayos de procedencias. Para el caso de melina, los estudios a nivel clonal relacionados con las propiedades físico-mecánicas son escasos en la literatura.

La presente investigación tiene como objetivo analizar las características físico-mecánicas de la madera proveniente de un ensayo genético de *Gmelina arborea* y su relación con los conjuntos genéticos utilizados, que permitan determinar la variabilidad de las propiedades físico-mecánicas a nivel clonal.

Materiales y métodos

Recolección y preparación de muestras

Las muestras fueron recolectadas de dos ensayos genéticos de melina, con una edad de tres años, ubicados en el cantón de Pococí, zona Atlántica de Costa Rica. Cada ensayo estaba compuesto por 29 clones y un testigo, los árboles fueron plantados a un distanciamiento de 3 metros entre árboles y 4 metros entre hileras. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, compuesto por seis bloques y dos parejas por clon, en cada bloque. Para el establecimiento de la plantación se realizó preparación mecánica del terreno y se aplicó fertilizante químico.

Se colectaron muestras del fuste de 47 clones y de 8 árboles del material testigo de melina en condición verde, de cada árbol se obtuvo dos discos de madera de 4 cm de espesor cada uno, uno de la base y otro a una altura de 5 m de altura, obteniendo un total de 4 muestras por clon debidamente identificadas y almacenadas en bolsas plásticas que se llevaron al Centro de investigación Forestal de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago.

Las muestras fueron ordenadas por clon y se enumeró cada disco según su posición en el fuste, donde 1 corresponde al disco de la base y 2 al disco a 5 m, a la vez se generó un código para las muestras de cada clon para determinar las propiedades físicas.

En cada uno de los discos se midió el diámetro en direcciones opuestas, con y sin corteza, duramen, albura y médula para obtener las áreas de cada una y el porcentaje de duramen, albura y médula.

Determinación propiedades físicas

Se procedió a cortar longitudinalmente el disco con un grosor aproximado de 3 cm agrupando la médula en el interior de la probeta. Cada probeta fue cortada a la mitad y debidamente identificada, para determinar el peso específico y la densidad verde. Estas muestras se procesaron bajo la norma ASTM, Vol. 04-09, designación D-143 (ASTM, 1986). El disco de madera a 5 metros de altura se seccionó en dos piezas de la circunferencia para obtener contracción radial y tangencial.

Se determinó el peso y el volumen de las muestras en condición verde y posteriormente se secaron las muestras en el horno a una temperatura de 105 °C por 24 horas, estas muestras secas se pesaron y luego se sumergieron en parafina líquida para determinar el volumen en condición seca. Estas medidas se realizaron de acuerdo con la norma D-2395-02 (Arce-Hernández, 2013). Los valores de peso, volumen verde y seco al horno se utilizaron para calcular la densidad verde, contracción radial, contracción tangencial, contracción volumétrica, relación R/T y peso específico.

Determinación de parámetros genéticos

Para la estimación de los parámetros genéticos se utilizó el software SELEGEN, versión 2016, 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, varias plantas por parcela, el modelo estadístico se presenta en la ecuación 1.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (1)$$

Donde, y es el vector de datos, r es el vector del efecto de repetición (asumido como fijo) y sumados a la media general, g es el vector del efecto genético total (asumido como aleatorio), p es el vector de los efectos de parcela y e es el vector del término del error o residuo (aleatorio). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos (Resende, 2016). Posteriormente, se realizaron

correlaciones genéticas que permitan analizar interrelaciones entre las diversas variables evaluadas, a través del modelo estadístico 102 del software SELEGEN (Resende, 2016).

Análisis estadístico

Para las propiedades de la madera evaluadas tanto para los clones como para el material testigo, se estimó la media, desviación estándar y el coeficiente de variación, con el fin de conocer el grado de estabilidad en la propiedad evaluada. Posteriormente se realizó un análisis de varianza, para ello primeramente fue verificada la normalidad de los datos y la homogeneidad. Se utilizó el programa Infostat para llevar a cabo el análisis estadístico. La significación estadística se fijó en $p < 0,05$. La diferencia entre las medias de los clones se estableció por la prueba de Tukey a una significancia de 95%.

Resultados

El DAP promedio de los árboles muestreados fue de 26.54 cm para el material clonal, que presentó un diámetro de duramen de 15.23 cm; mientras que los árboles del material testigo presentaron un DAP de 20.84 cm y el duramen de 8.96 cm. En términos porcentuales la diferencia de la albura y el duramen entre los materiales utilizados es bastante visible, en vista de que el porcentaje de duramen y albura para el material clonal fue de 57.32% y 42.99%, respectivamente, mientras que para el material testigo fue de 42.96% y 57.04% para el duramen y la albura, respectivamente. La medula mostró valores bajos, con un valor de 0.02% para el material clonal, mientras que el material testigo no presentó medula (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valores de albura, duramen y porcentaje de medula en las trozas de *Gmelina arborea* utilizadas para el muestreo de las propiedades físicas y mecánicas, proveniente de una plantación de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.

Material	Diámetro (cm)		Porcentaje		
	Promedio	Duramen	Duramen	Albura	Medula
Clones	21.47	11.03	51.37	48.37	0.26
Testigo	17.22	7.30	42.39	57.61	0.0

El análisis de los parámetros genéticos mostró que las variables que presentaron los mayores valores de heredabilidad son: peso específico, densidad verde y contracción volumétrica, lo anterior para todos los materiales evaluados. Con relación a las otras variables, los coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon fueron bajos, dichos resultados son consistentes con los valores de precisión obtenidos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Parámetros genéticos para las propiedades físicas y mecánicas de melina, zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	H²g	H²mc	Precisión
DAP	0.003	0.048	0.220
Espesor de corteza	0.043	0.402	0.630
Diámetro duramen	0.076	0.594	0.770
Ancho de albura	0.001	0.028	0.169
% medula	0.012	0.102	0.320
% duramen	0.016	0.224	0.474
% albura	0.016	0.226	0.476
médula	0.008	0.128	0.359
Peso específico	0.311	0.959	0.979
Densidad verde	0.100	0.793	0.890
Contracción volumétrica	0.093	0.734	0.856

H²g: Heredabilidad individual en sentido amplio y, H²mc: Heredabilidad media del clon.

Se determinó que el contenido de humedad varió de 56.28% a 167.28%. El clon 138 es el que presentó el valor más alto, mientras que el clon 132 fue el que presentó el valor más bajo (Figura 6 a).

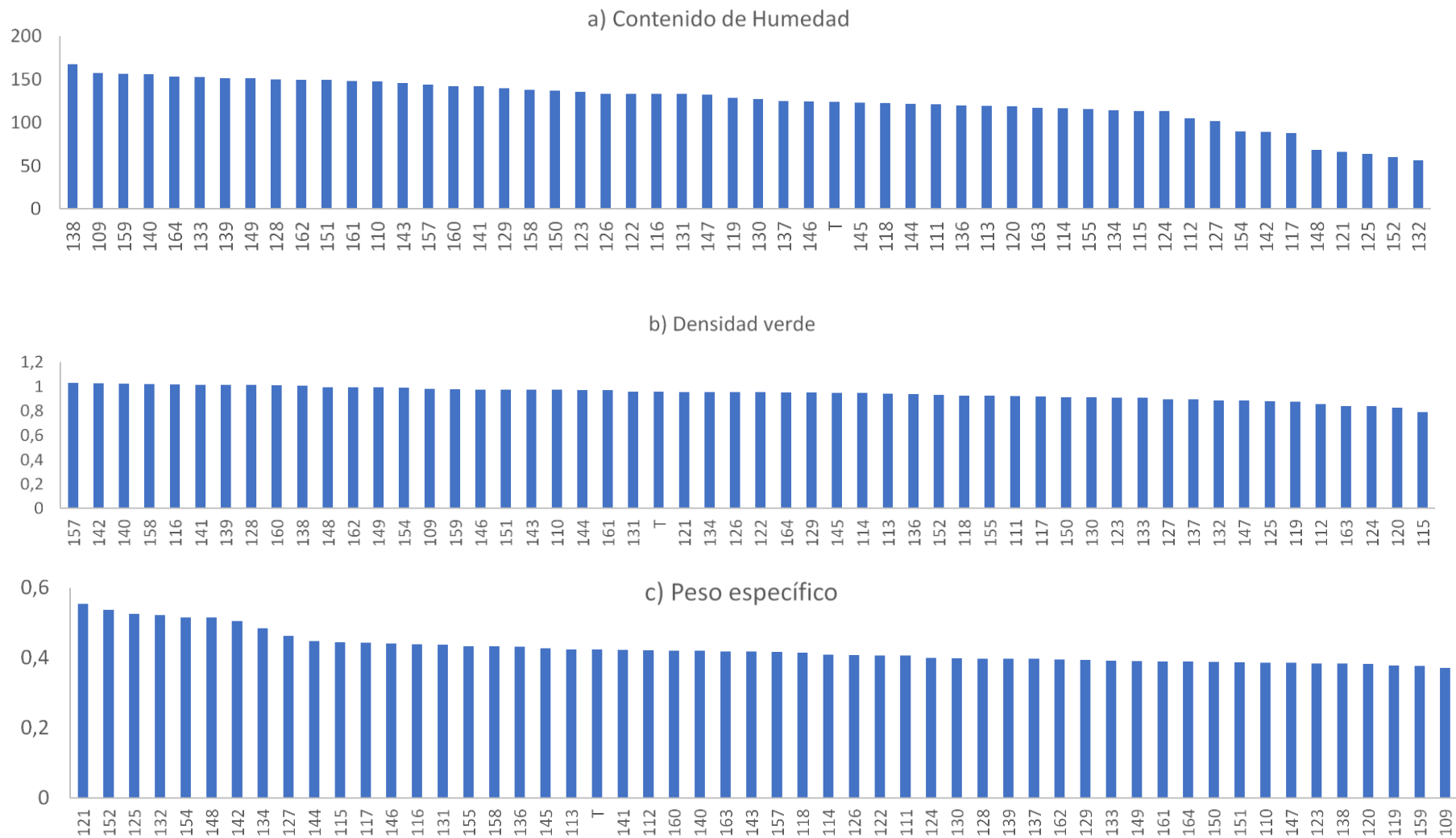


Figura 6. a) Contenido de humedad, b) densidad verde y c) peso específico de clones de melina con 3 años de edad, zona Atlántica, Costa Rica.

El análisis de varianza refleja diferencias estadísticas entre los clones. El clon 138 es el que presentó mayor contenido de humedad y difiere estadísticamente del resto, y los clones 132, 152, 121 y 125 presentaron menores porcentajes de contenido de humedad y reflejaron diferencias significativas con el resto de los clones. (Figura 6a, anexo 1).

El análisis de la densidad verde mostró un valor mínimo de 0.79 g/cm³, que corresponde al clon 115, el cual muestra diferencias significativas con los primeros 23 clones, según se muestra en la figura 6 b, es decir, con los clones del 157 al 131. Los clones 157, 158, 140 y 142 son los que presentan los valores más altos de densidad en verde entre un rango de 1.02 g/cm³ a 1.03 g/cm³ (Anexo 2). El peso específico básico mostró un valor promedio de 0.43, con un valor mínimo de 0.37 (Cuadro 10), correspondiente al clon 109 y con un valor máximo de 0.55 que corresponde al clon 121, el cual difiere estadísticamente del resto de los clones, de igual forma, los clones 109, 119 y 159 presentan los menores valores y son estadísticamente diferentes del resto (Figura 6 c, Anexo 3).

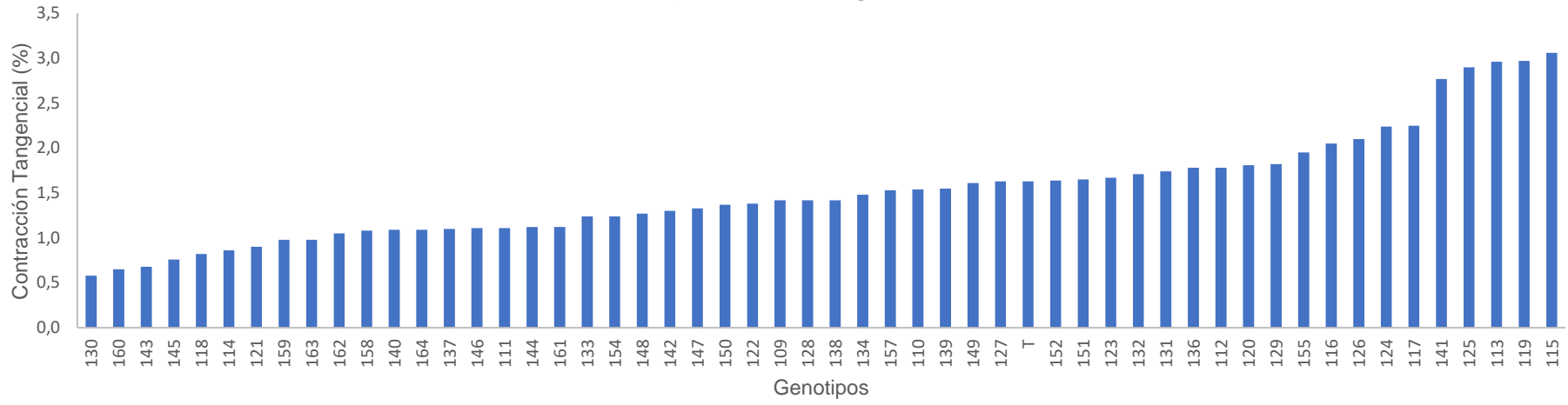
Cuadro 10. Propiedades físicas de la madera de clones de *Gmelina arborea* Roxb., zona Atlántica de Costa Rica.

Propiedad	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Contenido de Humedad (%)	123.2	56.28	167.27	26.77
Densidad verde (g/cm ³)	0.94	0.79	1.03	0.10
Peso específico básico	0.43	0.37	0.55	0.05
C. Tangencial (%)	1.47	0.58	3.06	0.68
C. Radial (%)	1.67	0.52	4.01	1.56
C. volumétrica (%)	5.84	3.10	8.56	2.48
Relación T/R (%)	1.28	0.20	3.71	1.04

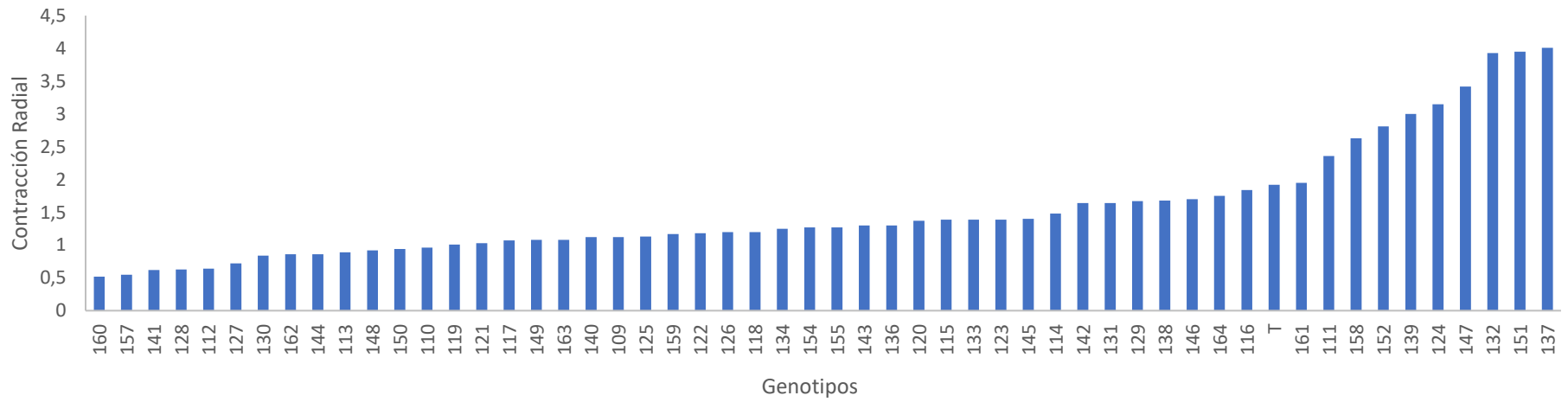
La contracción tangencial vario de 0.58% a 3.06%, donde el clon 130 fue el que presentó el valor más bajo, mientras que los clones 141, 125,113, 119 y 115 fueron los que presentaron los mayores valores, aunque estadísticamente no existen diferencias significativas entre todos los clones (Figura 7a). Con relación a la contracción radial la tendencia de algunos clones es similar a la contracción tangencial, donde el clon 160 presentó el valor más bajo con 0.52%, mientras que los clones 132, 151 y 137 presentaron los valores más altos de contracción radial (Figura 7b, Anexo 5).

La contracción volumétrica presentó en promedio un valor de 5.84% con un valor mínimo de 3.1% y un valor máximo de 8.56%, donde el clon 132 presentó el valor más bajo, reflejando diferencias significativas con el resto de los clones, mientras el clon 147 presentó el valor más alto con diferencias estadísticamente significativas con relación al resto de los individuos (Figura 7 c, Anexo 6). La razón de contracción en promedio fue de 1.28% (Cuadro 10), con un valor mínimo de 0.20%, correspondiente al clon 137, mientras que el valor máximo fue de 3.71%, el cual corresponde al clon 113, no obstante, no se reflejaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 7d, Anexo 7).

a) Contracción Tangencial



b) Contracción Radial



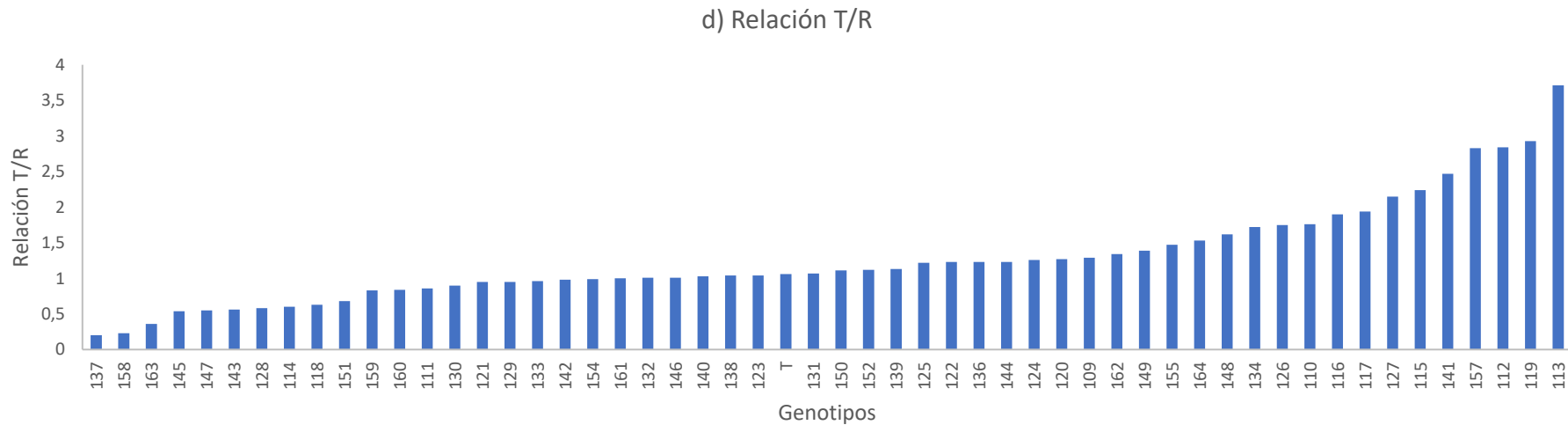
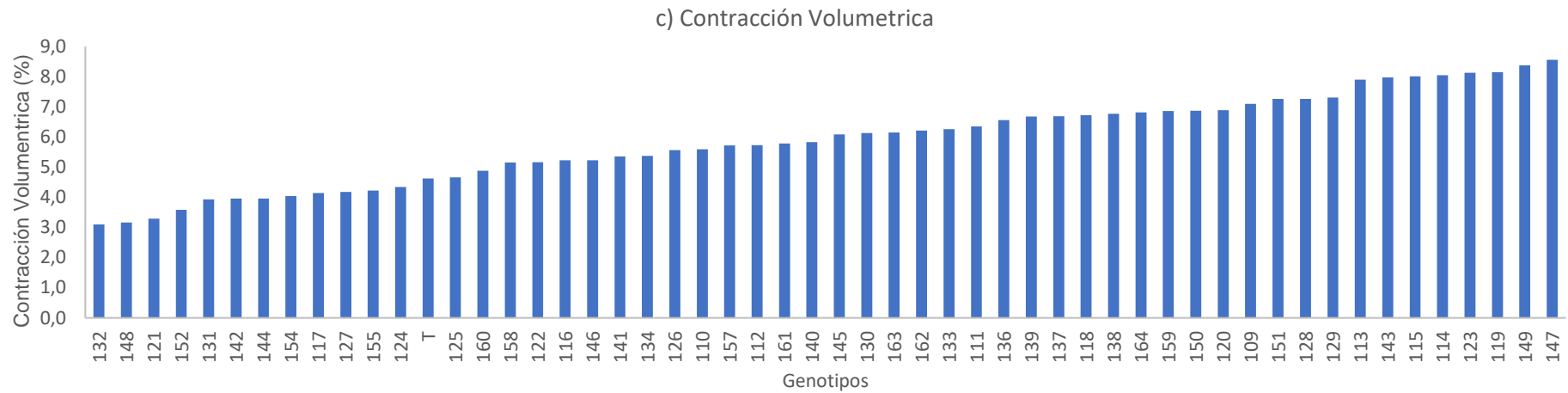


Figura 7. Contracción volumétrica (a) Contracción tangencial (b), contracción radial (c), y razón de contracción (d) para clones de *Gmelina arborea*, provenientes de una plantación de 3 años, zona Atlántica de Costa Rica.

Discusión

Duramen-albura

La calidad de la madera está determinada en su mayoría por sus características; las cuales son el producto de las propiedades físicas y químicas. En este trabajo se analizó madera proveniente de una plantación de tres años, es decir madera juvenil, sin embargo, es necesario tener presente que actualmente se cuenta en Costa Rica, con materiales que tienen un crecimiento bastante rápido, lo que permite realizar aprovechamientos a muy corta edad, de árboles con dimensiones adecuadas para la industrialización de diámetros menores, por lo tanto, resultados como los obtenidos en este trabajo, principalmente los valores de peso específico, evidencian la posibilidad de obtener madera de calidad, para ser utilizada en diversos usos y el potencial que tiene la madera de melina proveniente de plantaciones jóvenes.

Los árboles presentaron un diámetro promedio que permite su aprovechamiento para productos varios, o para generar materia prima para la elaboración de embalajes. Al comparar los árboles provenientes de material clonal con los del material testigo, aunque estos últimos la muestra fue menor, se observa una diferencia importante tanto en diámetro del fuste como en el diámetro del duramen.

El material testigo presenta un valor superior al 50% de diámetro de albura, por el contrario, los clones reflejan un diámetro de duramen superior al 50%, siendo esta una característica importante para efectos del uso final que se le dé a la madera aserrada, en vista de que las propiedades de dureza de la madera pueden ser influenciadas negativamente, en caso de que se use la madera a la intemperie o en contacto directo con agentes como agua, suelo, insectos, etc., (Rivero, 2004). El crecimiento registrado para el material clonal en términos del diámetro fue superior al material testigo, lo que presupone mayores rendimientos en términos de volumen comercial.

El espesor de la albura en caso de plantaciones comerciales debe ser idealmente en menor proporción, esto porque, aunque esta puede ser comercializable, el valor estético y de durabilidad de la misma es inferior a la madera de duramen (Arce, 2013). No obstante, en el caso de melina esta condición puede no ser tan determinante para

la comercialización de la madera, según el producto final a producir, de acuerdo con Canessa (2002) y Zeledón (2002), en condición verde la albura generalmente se distingue del duramen y en condición seca, no se presenta variación significativa de color, que en términos estéticos no genera un problema a la hora de comercializar la madera, en caso de que se utilice en construcción o mueblería.

Parámetros genéticos

El análisis genético en general mostró valores de heredabilidad individual y heredabilidad media clonal bajos, a excepción del peso específico, densidad verde y contracción volumétrica. De las anteriores, el peso específico básico es la variable más importante para efectos de selección del material genético, en vista de que las otras propiedades de la madera están relacionadas con dicha variable, siendo ésta la que más peso tienen para efectos de uso, trabajabilidad y selección del material genético. Lo anterior, permite suponer un mayor control genético para dichas variables y por lo tanto, las posibilidades de obtener ganancias genéticas con la utilización de material seleccionado, concordando con lo mencionado por Lauridsen y Kjaer (2002), al afirmar que se pueden obtener ganancias sustanciales en producción y calidad utilizando el mejor material vegetal posible, con respecto a la calidad genética, es decir, potencial para una buena adaptación y crecimiento para los sitios de plantación dados.

De acuerdo con los coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media clonal de los caracteres evaluados, la selección sería más efectiva si se hace con base al peso específico y menos efectiva si la selección se realiza con base a la densidad verde y contracción volumétrica, sobre todo tratándose de material proviene de plantaciones jóvenes, donde los estudios sobre la variación genética en las propiedades de la madera juvenil, su heredabilidad, su correlación con el crecimiento de los árboles, y su impacto en productos de uso final, son escasos (Zobel y Sprague, 1998).

Propiedades físicas

El conocimiento de las propiedades físicas de la madera, tales como el peso específico, densidad verde y contenido de humedad, permite saber las características generales de la madera y analizar el posible comportamiento durante su

procesamiento (aserrío), secado y elaboración del producto final (Arce, 2013). La madera de melina se caracteriza por tener un alto contenido de humedad (Sattar et al.,1991), lo que requiere darle el debido tratamiento de secado para su posterior procesamiento y elaboración de producto final, por lo tanto, es de vital importancia reducir su contenido de humedad, con el fin de obtener un producto estable dimensionalmente (Serrano y Córdoba, 2002).

El contenido de humedad tiene repercusiones económicas, en vista de que puede aumentar los costos de transporte y alarga el tiempo de espera de secado de la madera (Hernández, 2012). En este trabajo se obtuvo un contenido de humedad con un valor promedio de 123.2%, lo cual coincide con otros estudios realizados en melina.

A nivel clonal, existe un grupo de clones que presentan un mayor contenido de humedad con relación al resto, mostrando diferencias estadísticamente significativas, dividiendo la muestra evaluada de clones en dos grupos, Moya (2001), obtuvo valores de contenido de humedad en árboles provenientes de plantaciones de melina creciendo en la zona atlántica y zona norte de Costa Rica, con un rango de edad que va desde los 3 a los 12 años, con valores de contenido de humedad de 172.84 (3.5 años), 75.62 (4 años),113.18 (12 años),152.47(3 años),104.42 (3 años), valores que presentan similitud con el promedio obtenido en este trabajo.

Rivero (2004) evaluó las propiedades físicas y mecánicas de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, donde obtuvo para la especie *Gmelina arborea* un contenido de humedad en verde de 182%, mientras que la especie *Tectona grandis* presentó un contenido de humedad en verde de 106.68%. Lo anterior refleja el alto contenido de humedad que tiene la madera de melina y a la vez la necesidad de generar información tecnológica sobre el secado de la madera para un aprovechamiento integral de la misma.

La densidad verde mostró diferencias a nivel clonal donde el clon 157 fue el que presentó el mayor valor (1.02 g/cm³), contrastado con el clon 115, que presentó el valor mínimo (0.79 g/cm³). De acuerdo con Moya (2001), en plantaciones de melina de diferentes edades reportó los siguientes resultados de densidad verde para la zona Atlántica de Costa Rica: para tres años y medio de edad 0.93 g/cm³, para cuatro años

0.65 g/cm³, para 12 años 0.95 g/cm³; y valores de densidad verde para melina en la zona Atlántica y para la zona Norte de Costa Rica en dos sitios diferentes los siguientes valores de densidad verde: para tres años de edad 0.72 y 0.93 g/cm³. Por su parte, Coromoto (2011) obtuvo un valor de 0.746 g/cm³, en plantaciones de *Gmelina arborea* de 25 años de edad.

Con relación al análisis del peso específico básico, se obtuvo un valor promedio de 0.43, sin mostrar diferencias estadísticamente significativas a nivel clonal, este valor se encuentra dentro del rango encontrado en la literatura para la melina. El clon que mostró el valor máximo fue el 121, mientras que el clon con el menor peso específico básico fue el 109. Existen reportes de peso específico básico para *G. arborea* desde hace décadas, Chudnoff (1980), reportó un valor promedio de peso específico básico de 0.41 para plantaciones de 20 años de edad. Sandoval (1988) registró un valor de 0.43 de peso específico básico, en plantaciones de 14 años de edad y Coromoto (2011), obtuvo en plantaciones de melina de 25 años de edad un valor promedio de 0.40 g/cm³, estos dos últimos en plantaciones establecidas en Venezuela. Lo anterior evidencia la calidad del material genético evaluado, en vista de que se trata de una plantación joven, sin embargo, ya muestra valores de peso específico básico bastante altos, si se toma en cuenta la edad de evaluación (3.5 años).

En Costa Rica, Moya (2001), reporta valores de peso específico básico para la zona Atlántica de Costa Rica de 0.34 a los 3.5 años de edad, 0.43 a los cuatro años y seis años de edad y de 0.45 a los ocho y doce años de edad, mientras que, para la zona norte del país, registró valores de 0.35 y 0.37 en dos sitios de plantación de tres años de edad. Lo anterior deja de manifiesto que, a pesar de existir investigación relacionada con la determinación de las propiedades físicas, los resultados muestran que existen variaciones entre valores obtenidos para los diferentes parámetros evaluados, las cuales se pueden explicar quizá por las diferencias a nivel de sitio, manejo silvicultural y edad de la plantación.

Con relación a los valores de contracción, se encontró que en general la madera presentó valores promedio, bajos, con valores de 1.47%, 1.67% y 5.84% para la contracción tangencial, radial y volumétrica, respectivamente, además de una razón de contracción baja (1.28), lo que potencialmente se podría afirmar que la madera de melina analizada, no presentará mayores problemas de estabilidad dimensional a la

hora del secado, sin embargo, es necesario tomar en cuenta el peso específico básico obtenido, el cual influye de manera significativa en el procesamiento de la madera.

Los valores obtenidos contrastan con los reportados en otros estudios para melina, con valores de contracción tangencial, radial y volumétrica para árboles de 3 años de edad de melina de 5.67%, 3.03% y 10.71%, respectivamente, Downs (2003). Rivero (2004) presenta valores de 7.62%, 3.02% y 10.41%, para la contracción tangencial, radial y volumétrica, respectivamente.

Las contracciones en general (radial, tangencial y volumétrica), van a determinar la estabilidad dimensional de la madera, de ahí la importancia de que se presenten en menor magnitud. Los problemas durante el secado como torceduras y agrietamientos tienen relación con las contracciones que la madera puede presentar, así como su relación con el peso específico básico, que se influye directamente con una menor resistencia a la tensión perpendicular lo que facilita la separación o torcedura de sus elementos (fibra), (Casto y Raigosa, 2000).

Otros estudios en melina de 25 años de edad, en Venezuela, reportan valores de contracción desde la condición de humedad verde a seca al horno de contracción radial promedio de 2.922 %, contracción tangencial promedio de 4.682 %, contracción volumétrica promedio de 7.842 %, y relación T/R promedio de 1.663 (Coromoto, 2011). Por otra parte, Muñoz y Berrocal (2005) registran para melina a los 7 años de edad, valores de contracción total radial, tangencial y volumétrica de 2.314%, 5.858% y 7.706%, respectivamente.

A nivel clonal no se presentó una tendencia que refleje el comportamiento de los clones con relación a las propiedades de físicas evaluadas, además, de acuerdo con los resultados obtenidos no se encontraron diferencias estadísticas entre los materiales evaluados.

Conclusiones

La madera de melina se ha convertido en un recurso que contribuye al faltante de materia prima para la industria forestal. Los esfuerzos por trabajar y optimizar un paquete tecnológico integrado se hacen cada vez más necesarios, dejando de manifiesto la investigación de las propiedades físico-mecánicas, sobre todo cuando

se trata de material clonal que forma parte de los programas de mejoramiento genético utilizados para reforestación en Costa Rica.

Debido al mejoramiento genético los turnos de corta se han reducido, de ahí la importancia de trabajar con material a diferentes edades que permitan conocer las características de la madera de edad juvenil, intermedia y madura, y a la vez conocer el potencial que tiene como materia prima para la construcción, tableros, contrachapados, entre otros.

Los resultados obtenidos presentan propiedades físico-mecánicas (peso específico básico, contracciones) que reflejan una estabilidad dimensional favorable, y tomando en cuenta aspectos de secado y calidad de la madera, reflejan el potencial que tiene la madera de melina para los diversos productos forestales.

Referencias bibliográficas

- Arce-Hernández, N. 2013. Determinación de propiedades generales, físicas y de color para 20 clones de *Tectona grandis* en la zona de Peñas Blancas Guanacaste, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal. ITCR, Cartago. p. 44.
- ASTM (American standard of testing and materials, US). 1986. Annual Book of ASTM Standards. Standard methods of testing: Small clear specimens of timber. Philadelphia, US. S.e. Vol. 04-09 Wood. p. 48-104.
- 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.
- Canessa, E., 2002. Biodeterioro y preservación de la madera. In Seminario: La Industria y la comercialización de productos forestales en Latinoamérica. INISIFOR –UNA., 1, 2002. Heredia, C.R. p. 135-140.
- Castro F., Raigosa, J. 2000. Crecimiento y Propiedades Físico-Mecánicas de la madera de Teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. Revista Agronomía Costarricense 24 (2): 07- 23.
- Coromoto, C. G., Nismet, Z. Y., Coromoto R. C. E., Betancourt M. J. R., Will V. S. 2011. Propiedades físicas de la especie *Gmelina arborea*, de 25 años de edad provenientes de las plantaciones de la Reserva Forestal de Ticoporo, estado

- Barinas, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, Año XLV, Volumen 55(2), p. 193-201.
- Chudnoff, M. 1984. Tropical Timbers of the World. Agriculture Handbook Number 607. Madison, Wisconsin. USDA forest Service.
- Downs, R. G. 2003. Estudio tecnológico de la madera de *Gmelina arborea* Roxb. proveniente de plantaciones jóvenes del estado de Campeche. Tesis profesional. Chapingo, Texcoco, México. 72 p.
- Hernández, E. E. 2012. Propiedades físicas de la madera de *Gmelina arborea* (Roxb.) proveniente de plantación, que repercuten en su calidad. Tesis de Licenciatura. Universidad del Mar, Oaxaca, México. 120 p.
- Hung, T., Brawner, J., Meder, R., Lee, D., Southerton, S., Thinh, H., y Dieters, M. 2014. Estimates of genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus pellita* F. Muell. to support tree breeding in Vietnam. *Annals of Forest Science*. 72. 205-217. 10.1007/s13595-014-0426-9.
- Lauridsen, E.B. y Kjaer, E. D. 2002. Provenance research in *Gmelina arborea* Linn., Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. *Int. Forestry Rev.* 4 (1): 1–15.
- Moya, R. 2001. Estudio de las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de melina (*Gmelina arborea*) creciendo en Costa Rica. *Boletín Kurú* N° 31: 21-25.
- 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*, v.11, n.3, p.51-58.
- Muñoz F., y Berrocal, A. 2005. Secado experimental de *Gmelina arborea* Roxb. Proveniente de la Zona Atlántica de Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, N. 2 (4).
- Rivero M. J. G. 2004. Propiedades físico-mecánicas de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* Linn. F. Cochoamba, Bolivia, 73 p.
- Sandoval, Y. O. 1988. Producción de tableros de partículas a partir de *Gmelina arborea* de 14 años de edad proveniente de la Reserva Forestal de Ticoporo Unidad II. Trabajo de grado. Maestría de Tecnología de Productos Forestales. Cefap, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 192 p.

- Serrano, R; Córdoba, R. 2002. Algunos aspectos de tecnología de la madera. Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal-CIIBI. 66 p. (Curso para la Empresa Ecowood Maderín Eco. S.A.).
- Resende, M. D. V. de. 2016. SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada. (Programa de cómputo). Brasília, BR, EMBRAPA.
- Santos, P., Geraldi, I., Garcia, J. 2003. Estimates of genetic parameters for physical and mechanical properties of wood in *Eucalyptus grandis*. Scientia Forestalis/Forest Sciences. 63. 54-64.
- Santos, P., Geraldi, I., Garcia, J. 2004. Estimates of genetic parameters of wood traits for sawn timber production in *Eucalyptus grandis*. Genetics and Molecular Biology. 27. 10.1590/S1415-47572004000400017.
- Santos, P., Geraldi, I., Garcia, J. 2003. Estimativas de parâmetros genéticos de propriedades físicas e mecânicas da madeira em *Eucalyptus grandis*. Scientia Forestalis, Piracicaba, n.63, p.54-64.
- Zeledón, D. 2002. Evaluación de las características anatómicas de la madera de *Gmelina arborea* creciendo en plantaciones de Costa Rica. Informe de Práctica de Especialidad. Cartago, CR. ITCR. Esc. de Ing. Forestal y Madrid, ES, Universidad Politécnica de. Esc. Técnica Superior de Ingenieros en Montes. Cátedra de Tecnología de la Madera. 105 p.
- 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.
- Zobel, B. J., Sprague, J. R. 1998. Juvenile wood in forest trees. Springer Series in Wood Science. Springer- Verlag, Berlin, Germany. 300 pp.

Capítulo IV

Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en la zona Atlántica de Costa Rica

Resumen

La *Gmelina arborea* es una de las especies de mayor importancia en proyectos de reforestación comercial en Costa Rica y actualmente forma parte importante del programa de mejoramiento genético en Costa Rica liderado por GENFORES. El objetivo del presente estudio consistió en determinar los parámetros genéticos de los clones de melina utilizados en un ensayo clonal en la zona Atlántica de Costa Rica. El ensayo se estableció con un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por tratamiento, con un distanciamiento de 4 m x 3 m. Se calcularon parámetros genéticos a los 10, 22 y 34 meses, para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste, utilizando el software SELEGEN, el cual se basa en el método REML/BLUP, además, se realizaron correlaciones genéticas entre las variables evaluadas. Los resultados muestran mayor heredabilidad individual en sentido amplio para las variables cuantitativas de volumen comercial y DAP, además, reflejan que la calidad presenta los mayores coeficientes de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon. Las correlaciones genéticas reflejan que los mayores porcentajes de correlación se presentan entre las variables DAP-volumen comercial y altura comercial-calidad del fuste, a los 34 meses de edad, con un 0.97 y 0.74, respectivamente. Los clones 117 y 134, mostraron ser los mejores en el ranking genético en términos de volumen comercial; el testigo y el clon 119, fueron los que se ubicaron en las últimas posiciones del ranking. Se obtuvo una ganancia genética de 6.11% y 9.36% en los caracteres de DAP y volumen comercial, respectivamente. Se concluye que, a pesar de existir baja variabilidad genética en los materiales utilizados, es posible obtener ganancias genéticas importantes al utilizar los primeros diez clones del ranking genético de las accesiones evaluadas.

Palabras claves: mejoramiento genético, correlaciones genéticas, ganancia genética, parámetros genéticos.

Estimation of genetic parameters of *Gmelina arborea* Roxb. (melina) in the Atlantic zone of Costa Rica

Abstract

The *Gmelina arborea* is one of the most important species in commercial reforestation projects in Costa Rica and is currently an important part of the genetic improvement program led nationally by GENFORES. The objective of the present study was to determine the genetic variability of the melina clones used in a clonal trial in the Atlantic zone of Costa Rica. The trial was established with a randomized complete block design with four replications per treatment, with a distance of 4m x 3m. Genetic parameters were calculated at 10, 22 and 34 months of age, for the variables diameter at breast height (DBH), commercial height, commercial volume and stem quality, using the SELEGEN software, which is based on the REML / BLUP, in addition, genetic correlations were made between the evaluated variables. The results show a greater individual heritability in the broad sense for the quantitative variables of commercial volume and DAP, in addition, they reflect that the quality presents the highest coefficients of individual heritability and average heritability of the clone. The genetic correlations reflect that the highest correlation percentages are found between the variables DAP-commercial volume and commercial height-stem quality, at 34 months of age, with 97% and 74, respectively. Furthermore, that clones 117 and 134 showed to be the best in the genetic ranking in terms of commercial volume; the witness and clone 119, were those that were in the last positions of the ranking. A genetic gain of 6.11% and 9.36% was obtained in the characters of DAP and commercial volume, respectively. It is concluded that, despite there being low genetic variability in the materials used, it is possible to obtain significant genetic gains by using the first ten clones of the genetic ranking of the evaluated accessions.

Key words: genetic improvement, genetic correlations, genetic gain, genetic parameters.

Introducción

La reforestación comercial en Costa Rica se basa principalmente en la utilización de dos especies forestales, donde la *Gmelina arborea* (melina) se consolidó como una de las principales especies a plantar en Costa Rica (Moya, 2004, Murillo y Guevara, 2013). En la actualidad, la madera de melina sigue posicionada en el mercado local, por su versatilidad, es utilizada para la fabricación de material de embalaje, para la industria de construcción y para la ebanistería en la fabricación de muebles (Barrantes y Ugalde, 2019, Moya, 2004). Es la segunda especie en importancia, en términos de volumen aprovechable y valor de la madera (en pie, en patio y aserradero), (Chavarría, 2015, Barrantes y Ugalde, 2019).

Con el impulso de los programas de mejoramiento en Costa Rica, a partir de los años 90's (Murillo, 1992; Zeaser, 1998), se inicia un proceso que posteriormente se consolida bajo una estrategia de mejoramiento genético, basada en la silvicultura clonal (Badilla y Murillo, 2011). A partir del año 2002 se continua con un programa de mejoramiento genético para varias especies forestales, liderado por la Cooperativa Genética Forestal (GENFORES), dentro de las cuales se encuentra *Gmelina arborea*, de manera que se genere un paquete tecnológico que permita abordar los proyectos forestales con la especie melina de manera integral, tomando en cuenta aspectos relacionados con el incremento del crecimiento, de la productividad, propiedades físico-mecánicas, resistencia o tolerancia a enfermedades, calidad de la madera, forma del fuste, entre otros.

La evolución que ha experimentado el sector forestal en las últimas décadas y la aplicación de herramientas como la silvicultura clonal y la selección genética han potenciado un aumento en la productividad de las plantaciones de *Gmelina arborea*, reduciendo significativamente los turnos de corta, con la consecuente producción de madera para diversos usos (Ávila, et al., 2015).

La estimación de los parámetros genéticos, tales como el coeficiente de variación genética, la heredabilidad y las correlaciones genéticas, son de utilidad en el establecimiento de programas de mejoramiento, que permiten direccionar la selección de individuos con características superiores para el mejoramiento (Vencovsky; Barriga, 1992; Zimback et al., 2011; Zobel y Talbert, 1984). En este sentido el

programa de mejoramiento con *Gmelina arborea* en Costa Rica, cuenta con una amplia base genética, cuyos conjuntos genéticos se han venido evaluando en diferentes condiciones de clima, suelo y manejo silvicultural, con el propósito de incrementar la productividad y calidad de la materia prima generada.

De acuerdo con Kumar (2007), los parámetros genéticos son herramientas útiles para predecir la ganancia que se espera del material clonal. La variación entre clones se usa comúnmente como una estimación de la variación genética total y para calcular el grado de control genético para un rasgo particular (Foster y Shaw, 1988). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar los parámetros genéticos de materiales superiores de *Gmelina arborea* para darle continuidad a los programas de mejoramiento forestal de la especie.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó con información proveniente de un ensayo genético de clones de *Gmelina arborea*, establecido durante el mes de junio del 2015 en Cariari de Pococí, provincia de Limón, en las coordenadas geográficas N 10°44'.82" y W -83°79'06", con el objetivo de generar información sobre el comportamiento de los clones para el programa de mejoramiento genético de *Gmelina arborea* de GENFORES. El ensayo fue instalado con un diseño experimental en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento (clones). Los clones son distribuidos aleatoriamente en parejas dentro de cada bloque, con la condición de que no queden juntas un mismo tratamiento (parejas) dentro de un mismo bloque. El material genético pertenece a la empresa BARCA, y se utilizaron 54 clones y un testigo, los cuales se plantaron a una densidad de 833 árboles por hectárea, con distanciamiento de cuatro metros entre hileras y tres metros entre árboles.

Descripción del área de estudio

La topografía del terreno es casi plana con una pendiente menor al 5%, en general no presenta problemas de inundación o encharcamiento, por eventos de precipitaciones excesivas. Anteriormente fue utilizado para el cultivo de plantaciones de banano, por lo que presenta una red de drenajes importantes para la canalización del exceso de agua en casos de lluvias fuertes, no presentaba problemas de compactación, sin embargo, previo al establecimiento del ensayo se realizó una preparación mecánica

del área del terreno, además, se realizó una aplicación de fertilizante químico en el momento de la siembra, con el propósito de favorecer el desarrollo radicular de las plantas.

El tipo de suelo se clasifica dentro del orden Inceptisol (Mata y Castro, 2019) y el área de estudio se ubica dentro de la zona de vida Bosque muy Húmedo Tropical; presenta una temperatura media anual entre 26°C – 28°C y una precipitación media anual entre 4000 mm – 5000 mm, con una evapo-transpiración media anual mayor a 1100 mm y menor a 1200 mm, un brillo solar en promedio anual de 4 – 5 horas por día (IMN, 2005).

Recolección y análisis de la información

El ensayo clonal se midió en tres ocasiones, a los 10 meses, a los 22 meses y a los 34 meses. Para el levantamiento de la información se utilizó hojas de campo y el respectivo croquis que mostraba el diseño de cada ensayo. Se midieron las variables diámetro a la altura de pecho (DAP), altura comercial y la calidad del fuste comercial, que se cuantifica con base a la calidad de las primeras cuatro trozas, con una longitud de 2.5 metros cada una, donde 1 es la máxima calidad para aserrío y 4 es una troza sin valor comercial o utilizable para leña.

En el formulario de campo se registró para cada ensayo, 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 ó 2) así como los datos correspondientes a las diferentes variables a evaluar.

Análisis de datos

Para el análisis de la información se procedió a elaborar una base de datos que integrara las diferentes mediciones de las variables evaluadas a cada clon, en cada uno de los bloques del ensayo. Posteriormente a partir de los datos de DAP y altura comercial se procedió a calcular el volumen comercial con corteza utilizando la siguiente ecuación (1).

$$V_c = ((DAP/100)^2 * (\pi/4) * (H_{com})) * 0.65 \quad (1)$$

Donde V_c =Volumen comercial con corteza

DAP=Diámetro a la altura del pecho, medido a 1.3 m en cada árbol, con cinta diámetrica.

Hcom=Altura comercial estimada a partir de la cantidad de trozas comerciales posibles de 2.5 m largo en cada árbol.

Para el cálculo de la calidad del fuste se tomó en cuenta la cantidad de trozas estimadas por individuo y el valor asignado según la calificación para cada troza, para esto se utilizó 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 se corresponde a un árbol cuyo fuste cuenta con cuatro trozas.

$$\text{Calidad general} = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (2)$$

Dónde: $T1$, $T2$, $T3$ 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.

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

Posteriormente se procedió a conformar una base de datos en Excel que unificara para cada clon dentro de cada bloque todas las variables evaluadas y para cada una de las mediciones realizadas para su respectivo procesamiento.

Los análisis se realizaron utilizando el software SELEGEN, versión 2016, el cual se basa en el procedimiento estadístico REML/BLUP (Resende, 2007), utilizando el modelo 2, el cual se utiliza en ensayos dispuestos en bloques completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, el modelo estadístico se presenta en la ecuación 4.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (4)$$

Donde, y es el vector de datos, r es el vector del efecto de repetición (asumido como fijo) y sumados a la media general, g es el vector del efecto genético total (asumido como aleatorio), p es el vector de los efectos de parcela y e es el vector del término

del error o residuo (aleatorio). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos (Resende, 2007).

Dicho modelo permite estimar la varianza genética (V_g), Varianza ambiental entre parcela (V_{parc}), varianza residual o no explicada por el modelo (V_e), varianza fenotípica total (V_f), heredabilidad individual en sentido amplio (H^2_g), coeficiente de determinación de la parcela (C^2_{parc}), heredabilidad media del clon (H^2_{mc}), precisión en la estimación de los parámetros (Ac_{clonal}), coeficiente de variación genética, coeficiente de variación experimental ($CV_e\%$) y el coeficiente de variación relativa (CV_r), (Resende, 2007). El porcentaje de la ganancia genética se determinó con base al ranking genético que el software SELEGEN emite para cada análisis por carácter, utilizando el valor de ganancia genética que “arroja” el programa y comparándolo con la media general de la población, que también ofrece los resultados del análisis realizado por SELEGEN.

Posteriormente, se realizaron correlaciones genéticas (r) que permitan analizar interrelaciones entre las diversas variables evaluadas, a través del modelo estadístico 102 del software SELEGEN (Resende, 2007). Una vez estimados los coeficientes de correlación se confirmó la significancia estadística para “ r ”, mediante una prueba T, dada por la siguiente formula;

$$T_c = [r\sqrt{n-2}]/[\sqrt{1-r^2}] \quad (5)$$

La “T” calculada (T_c) se comparó con una T de la tabla (T_t), al nivel de significancia de 0.05 y 0.01, y con $(n-2)$ grados de libertad.

Resultados

El ensayo clonal bajo estudio se caracteriza por presentar un crecimiento uniforme, tanto en DAP como en altura comercial, sobre todo a partir de la segunda evaluación, además, de una buena calidad del fuste. Durante los primeros 10 meses del ensayo la tasa de crecimiento de las diferentes variables fue menor con relación a los otros períodos de evaluación, donde el DAP fue la variable que mostró mayor crecimiento, pasando de 6.69 cm a los 10 meses, hasta llegar a 21 cm a los 34 meses de edad, presentando un valor máximo de 28.3 cm y un valor mínimo de 8.7 cm, a los 34 meses (Cuadro 11).

La altura comercial presentó un comportamiento menos diferenciado durante todo el período de evaluación con un valor de 4.73 m, 9.08 m y 9.63 m, para el primero, segundo y tercer período de medición, respectivamente, con un rango de valores entre 2.5 m y 10 m de altura comercial. El volumen comercial, al ser una variable que involucra tanto el DAP como la altura comercial para su cálculo, está influenciado por ambas, mostrando un crecimiento de 0.0112 m³, 0.1418 m³ y 0.2247 m³, a los 10, 22 y 34 meses de edad, respectivamente (Cuadro 11).

La calidad presentó valores promedio de 89% y 84%, a los 22 y 34 meses de edad, respectivamente, con un valor máximo de 100% en ambas edades y un valor mínimo de 20% y 33%, respectivamente, según las edades de medición (Cuadro 11).

Cuadro 11. Características dasométricas de las variables de crecimiento de ensayo clonal de *Gmelina arborea* (melina) en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Variable / Edad (meses)	DAP (cm)			AltCom (m)			VolCom (m ³)			Calidad (%)	
	10	22	34	10	22	34	10	22	34	22	34
Promedio	6.69	17.03	21	4.17	9.08	9.63	0.0112	0.1418	0.2247	89	84
Máximo	12.9	23.30	28.3	6.42	10	10	0.0483	0.2701	0.4089	100	100
Mínimo	2	7.8	8.7	1.9	2.5	2.5	0.0004	0.0078	0.0097	20	33
Desviación estándar	1.91	2.33	2.83	0.77	1.59	1.17	0.01	0.05	0.07	16.96	16.58
Coefficiente de Variación	28.56	13.7	13.51	18.50	17.50	12.1	66.69	35.72	31.15	18.98	19.81

Donde: AltCom: altura comercial VolCom: Volumen comercial

Los parámetros genéticos calculados a excepción de la altura comercial (AltCom), todos los caracteres mostraron un comportamiento ascendente de acuerdo con la edad. La calidad del fuste fue la variable que presentó el mayor valor de heredabilidad individual, con valores de $h^2g = 0.10$ y 0.15 a la edad de 10 y 22 meses. Con relación a los caracteres de DAP, altura comercial y volumen comercial, a pesar de mostrar diferencias en el coeficiente de heredabilidad individual, en promedio muestran un valor similar, igual a $h^2g = 0.07$. En términos de heredabilidad media del clon, el DAP presentó los mayores valores, con un promedio de $h^2mc = 0.74$ seguido por el volumen comercial, el cual presentó un valor de $h^2mc = 0.70$; la altura comercial mostró un valor de $h^2mc = 0.63$. Con relación a la calidad del fuste, a los 22 y 34 meses de edad presentó un coeficiente de heredabilidad media del clon en promedio de 0.83 (Cuadro 12).

El coeficiente de variación genética y variación ambiental son en general bajos, donde el volumen comercial es la variable que presenta mayores valores en ambos coeficientes, que a la vez presenta mayores valores de coeficiente de variación relativa (CVr), lo anterior para los tres períodos evaluados. Para el caso del coeficiente de variación genético, el mayor valor se presenta a los 10 meses, con 14.4% en volumen comercial, el cual va disminuyendo conforme la edad, este mismo comportamiento se presenta con los otros caracteres evaluados y para los coeficientes de variación ambiental (Cuadro 12).

Para el caso del coeficiente de valor relativo, es a la inversa, conforme aumenta la edad este valor tiende a aumentar, siendo el mayor valor del CVr en el carácter de Calidad del fuste, con 1.07% a la edad de 34 meses. Los parámetros genéticos estimados para las distintas variables se pueden considerar confiables en la mayoría de los casos y para las tres evaluaciones realizadas, en vista de que todos presentan valores iguales o superiores a 75% de precisión (Cuadro 12).

En términos de ganancia genética la tendencia de los valores obtenidos por carácter es descendente conforme aumenta la edad. El volumen comercial presenta los mayores valores de ganancia genética durante el período de evaluación, seguido del DAP. La altura comercial y la calidad del fuste presentan los valores más bajos, respectivamente. A la edad de 34 meses los porcentajes de ganancia genética comparados con el material testigo, para el DAP, volumen comercial, altura comercial y calidad del fuste es de 6.11%, 9.36%, 2.15% y 5.18%, respectivamente (Cuadro 12).

El valor genético del volumen comercial permite conocer los límites inferior y superior para cada uno de los genotipos evaluados y a la vez compararlo con el valor promedio obtenido para la variable del volumen comercial a determinada edad. Específicamente a la edad de 34 meses el valor genético del volumen comercial se encuentra entre un límite inferior dentro del rango de 0.1532 m³ a 0.2325 m³ y un límite superior que se encuentra desde los 0.1869 m³ a 0.2740 m³ (Figura 7). Lo anterior comparado con el promedio del volumen comercial del ensayo a la misma edad (34 meses), el cual corresponde a 0.2247 (Cuadro 11) permite conocer cuáles clones se encuentran por encima o por debajo de la media obtenida.

Cuadro 12. Estimación de parámetros genéticos de un ensayo clonal de *Gmelina arborea* en tres edades diferentes, para los caracteres de DAP, altura comercial (AltCom), volumen comercial (VolCom) y calidad del fuste, en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Parámetros Genéticos	Caracteres y valores por edad de medición										
	DAP			AltCom			VolCom			Calidad	
	10	22	34	10	22	34	10	22	34	22	34
H²g	0,06	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08	0,10	0,15
H²mc	0,66	0,77	0,78	0,61	0,56	0,71	0,59	0,72	0,79	0,80	0,87
CVg%	7,55	3,51	3,55	5,06	4,59	2,92	14,40	8,85	8,04	6,14	7,34
CVe%	13,31	4,76	4,62	10,00	8,96	4,63	29,16	13,41	10,16	7,52	6,84
CVr%	0,57	0,74	0,77	0,51	0,46	0,63	0,49	0,66	0,79	0,82	1,07
Precisión	0,81	0,88	0,88	0,78	0,75	0,84	0,77	0,85	0,89	0,89	0,93
GG%	8.10	4.64	6.11	4.09	3.50	2.15	14.60	10.23	9.36	6.00	5.18

Donde: h^2g es la heredabilidad individual, h^2mc es la heredabilidad media entre clones, CVg% es el coeficiente de variación genético, CVe% es el coeficiente de variación ambiental y CVr es la relación entre el coeficiente de variación genética y el coeficiente de variación ambiental y GG es la ganancia genética.

La figura 8 permite observar gráficamente el valor genético del volumen comercial, de acuerdo con los elementos descritos anteriormente, además, permite observar cuales son los mejores clones de acuerdo con la posición en el ranking genético, donde el clon 117 y 134 ocupan los dos primeros lugares, mientras que el material testigo y el clon 119, son los que se localizan en la última y penúltima posición del ranking, a la vez se puede observar que poco menos de la mitad de los clones (26 clones) se ubican por

encima del promedio general y constituyen los individuos más productivos en términos de volumen comercial el ensayo genético.

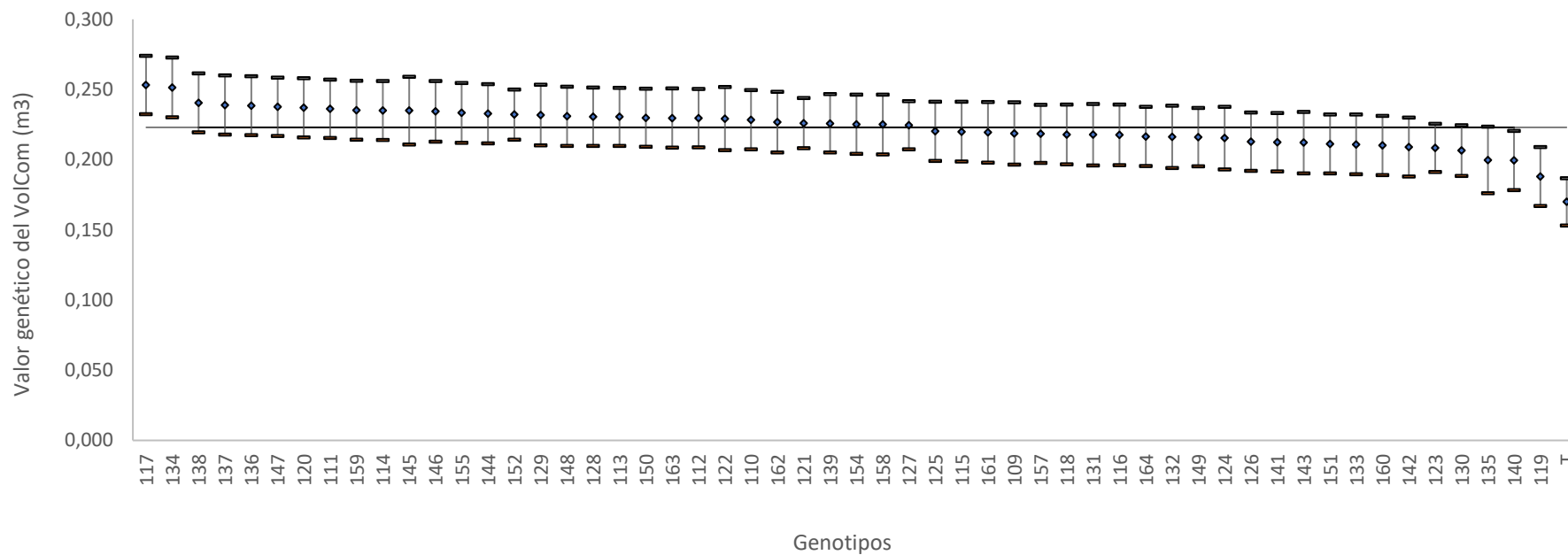


Figura 8. Valores genéticos para la variable volumen comercial (m³) estimado a los 34 meses de edad para 55 genotipos en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Las correlaciones genéticas entre las variables evaluadas durante las tres evaluaciones, los mayores valores se presentan entre el DAP y volumen comercial, y la altura comercial entre la variable calidad, así como las variables entre sí y sobre todo cuando se trata de la misma medición o el mismo período de medición. Se reflejan valores de correlación más altos a edades superiores, donde a los 34 meses se da con mayor frecuencia las correlaciones entre variables (Cuadro 13).

El DAP con el volumen comercial presenta una correlación de 0.90, mientras que la altura comercial con el volumen comercial y la calidad del fuste presenta una correlación de 0.73 entre ambas variables; mismo comportamiento se refleja a la edad de 34 meses, donde el DAP con el volumen comercial presenta un 0.97 y la altura comercial con el volumen comercial y la calidad del fuste presenta una correlación de 0.68 y 0.74, respectivamente. El DAP a los 22 meses refleja una corrección alta entre el DAP y el volumen comercial a los 34 meses, con 0.83 y 0.80, respectivamente (Cuadro 13).

Cuadro 13. Correlación de parámetros genéticos a diferentes edades de medición para los caracteres de DAP, altura comercial (AltCom), volumen comercial (VolCom) y Calidad del fuste, de un ensayo clonal de *Gmelina arborea*, en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Edad	10 meses			22 meses				34 meses			
Variable	DAP	AltCom	VolCom	DAP	AltCom	VolCom	Calidad	DAP	AltCom	VolCom	Calidad
DAP	-	0,85**	0,97**	0,36	0,22	0,35	0,18	0,51*	0,13	0,47*	-0,01
AltCom		-	0,86**	0,46*	0,24	0,42*	0,06	0,62*	0,14	0,56*	-0,04
VolCom			-	0,39*	0,22	0,38*	0,15	0,53*	0,13	0,49*	0,02
DAP				-	0,39*	0,90**	0,00	0,83*	0,40	0,80*	0,20
AltCom					-	0,73*	0,73*	0,50*	0,64*	0,58*	0,63*
VolCom						-	0,36	0,82*	0,58*	0,84**	0,45*
Calidad							-	0,10	0,55*	0,24	0,77*
DAP								-	0,50*	0,97**	0,24
AltCom									-	0,68*	0,74*
VolCom										-	0,40*
Calidad											-

DAP: Diámetro a la altura del pecho, AltCom: altura comercial, VolCom: volumen comercial, CalFuste: calidad del fuste.

La significancia de la correlación corresponde a $=p<0.05$; $**p<0.01$.

El ranking genético permite conocer la posición de los clones de acuerdo con su rendimiento, en este caso, en términos de volumen comercial. Los clones 134 y 117 se mantienen estables durante todo el período de evaluación, el clon 136, 152, 138, 147 y 114, mostraron una tendencia ascendente, mientras que otros como el 128, 151, 121 y el 160 mostraron un descenso en el ranking genético. Los clones 119, 140, 142, 135 y el testigo se ubicaron siempre en los últimos lugares del ranking genético (Figura 9).

Rankig	Edad (meses)		
	10	22	34
1	0,0137 (134)	0,1594 (134)	0,2515 (117)
2	0,0133 (138)	0,1593 (136)	0,2475 (134)
3	0,0130 (160)	0,1581 (117)	0,2451 (138)
4	0,0129 (159)	0,1568 (152)	0,2436 (136)
5	0,0128 (151)	0,1556 (128)	0,2427 (152)
6	0,0128 (117)	0,1548 (132)	0,2420 (145)
7	0,0127 (141)	0,1541 (137)	0,2413 (147)
8	0,0126 (140)	0,1536 (150)	0,2408 (114)
9	0,0125 (161)	0,1530 (121)	0,2402 (159)
10	0,0125 (148)	0,1526 (158)	0,2397 (137)
11	0,0124 (163)	0,1522 (139)	0,2392 (155)
12	0,0124 (128)	0,1517 (110)	0,2388 (112)
13	0,0123 (139)	0,1513 (147)	0,2385 (146)
14	0,0123 (155)	0,1510 (138)	0,2380 (128)
15	0,0123 (150)	0,1507 (163)	0,2376 (113)
16	0,0122 (158)	0,1504 (114)	0,2372 (111)
17	0,0122 (146)	0,1501 (120)	0,2368 (110)
18	0,0122 (145)	0,1498 (122)	0,2365 (148)
19	0,0122 (110)	0,1495 (112)	0,2361 (163)
20	0,0121 (154)	0,1493 (148)	0,2358 (144)
21	0,0121 (142)	0,1490 (154)	0,2354 (150)
22	0,0121 (111)	0,1488 (125)	0,2351 (121)
23	0,0120 (130)	0,1486 (145)	0,2348 (120)
24	0,0120 (137)	0,1483 (113)	0,2345 (139)
25	0,0120 (120)	0,1481 (144)	0,2342 (158)
26	0,0119 (136)	0,1479 (155)	0,2338 (122)
27	0,0119 (164)	0,1476 (124)	0,2335 (154)
28	0,0119 (121)	0,1474 (116)	0,2332 (162)
29	0,0118 (122)	0,1472 (126)	0,2329 (116)
30	0,0118 (152)	0,1469 (159)	0,2325 (124)
31	0,0118 (143)	0,1467 (162)	0,2322 (127)
32	0,0117 (112)	0,1465 (109)	0,2319 (118)
33	0,0117 (126)	0,1462 (129)	0,2315 (129)
34	0,0117 (157)	0,1460 (127)	0,2312 (149)

35	0,0116 (129)	0,1457 (115)	0,2308 (161)
36	0,0116 (114)	0,1455 (146)	0,2305 (126)
37	0,0116 (162)	0,1452 (111)	0,2301 (132)
38	0,0116 (132)	0,1450 (151)	0,2298 (164)
39	0,0115 (149)	0,1447 (161)	0,2294 (125)
40	0,0115 (113)	0,1444 (118)	0,2291 (157)
41	0,0115 (135)	0,1442 (160)	0,2287 (133)
42	0,0115 (147)	0,1439 (157)	0,2284 (115)
43	0,0114 (124)	0,1437 (149)	0,2281 (131)
44	0,0114 (133)	0,1434 (133)	0,2277 (130)
45	0,0114 (115)	0,1432 (164)	0,2274 (141)
46	0,0113 (144)	0,1429 (123)	0,227 (143)
47	0,0113 (131)	0,1426 (131)	0,2267 (160)
48	0,0113 (109)	0,1423 (142)	0,2264 (109)
49	0,0112 (127)	0,1420 (141)	0,226 (123)
50	0,0112 (123)	0,1417 (130)	0,2257 (142)
51	0,0112 (118)	0,1414 (135)	0,2253 (151)
52	0,0111 (116)	0,1411 (143)	0,2248 (140)
53	0,0111 (125)	0,1407 (119)	0,2243 (135)
54	0,0110 (119)	0,1403 (140)	0,2236 (119)
55	0,0110 (T)	0,1398 (T)	0,2226 (T)

Los valores entre parentesis corresponden al número de clones

Figura 9. Ranking genético del volumen comercial de *Gmelina arborea* de una plantación de 10, 22 y 34 meses de edad, en Cariari de Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Discusión

Los resultados obtenidos para las variables dasométricas reflejan un crecimiento que puede ser catalogado como moderado a bueno, comparado con otros datos de crecimiento registrados en región Atlántica de Costa Rica, donde se obtuvo un DAP promedio de 11.76 cm y un volumen comercial de 0.063 m³ en 18 meses (Salas, 2012). Kumar (2010), reportó para *G. arborea* un crecimiento menor a los obtenidos en este trabajo, para el DAP y altura promedio, a los tres años de edad, con valores de 6.48 cm y 8.15 m, respectivamente.

El coeficiente de variación para los diferentes caracteres evaluados en este estudio, muestran que a la edad de 34 meses existe variación importante, la cual se fundamenta en el material genético utilizado. Los clones con mejor desempeño en DAP, altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste son el 117 y 134, superando la media del ensayo en todos los caracteres evaluados, caso contrario

sucede con el clon 119 y el testigo, cuyos valores para las variables evaluadas son menores al resto del material evaluado. Lo anterior aplica para las tres evaluaciones realizadas, donde se mantuvo dicho comportamiento, que gráficamente se observa en la figura 8.

Parámetros genéticos

La estimación de los parámetros genéticos constituye una herramienta útil para la selección y predicción de ganancias genéticas (Kumar, 2007). Para el caso específico de este trabajo, los conjuntos genéticos fueron evaluados a los 10, 22 y 34 meses de edad, tiempo relativamente corto para la toma de decisiones relacionadas con la selección genética. En general, todos los caracteres cuantitativos evaluados presentaron bajos coeficientes de heredabilidad individual, lo cual puede tener explicación en la corta edad de la plantación, en la cual el material evaluado aún no ha expresado su potencial genético (Ávila et al., 2015, Pastrana, Espítia y Murillo 2012).

La calidad del fuste fue el carácter que mostró mayores valores de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon, sin embargo, es incierto la toma de decisiones con base a este carácter, en vista de que está muy influenciado por factores externos, principalmente el manejo silvicultural, como podas, raleos, daños por viento, entre otros. Un factor a considerar a la hora de analizar los resultados obtenidos de heredabilidad individual en sentido amplio es el valor del coeficiente de variación ambiental, que aumenta sistemáticamente conforme la edad, lo que explica en parte los resultados obtenidos para el parámetro de heredabilidad individual.

La heredabilidad media del clon muestra valores altos para los caracteres cuantitativos evaluados, principalmente para el DAP, volumen comercial y altura comercial, los cuales presentan valores superiores a 75%, donde el DAP y el volumen comercial presentaron valores en los parámetros genéticos de 78% y 79%, respectivamente, dichos estimados se pueden considerar como confiables, si se toma en cuenta que los valores de precisión son también altos, lo que permite mayor seguridad en caso de seleccionar con base a dichos caracteres (Pastrana et al., 2012). De acuerdo con Resende (2002), la precisión se clasifica como; muy alta (> 0.90), alta (0.70 a 0.90), moderada (0.50 a 0.70) y baja (<0.50). Para os caracteres

evaluados los valores se clasifican como altos, que de acuerdo con Resende (1995) en cuanto mayor sea la precisión mayor será la exactitud de la selección y, por lo tanto, mayor será la ganancia genética. La calidad del fuste, como era de esperar en este caso, presentó altos valores de heredabilidad media del clon, superiores al 80%.

El coeficiente de variación genético permite conocer la variabilidad existente dentro del material genético (Resende, 2007), el cual, para este estudio, se obtuvo un descenso en este parámetro conforme aumenta la edad, probablemente debido a un aumento en el coeficiente de variación ambiental. Los resultados para el valor genético del volumen comercial, obtenido a la edad de 34 meses y que se muestran en la figura 7, donde la distribución de los clones con relación a su valor genético es muy regular, no presentan un rango muy amplio entre los límites de dichos valores genéticos, de ahí que a pesar de existir un grupo de clones que sobrepasan la media, la diferencia no es muy significativa.

Correlaciones genéticas

Las correlaciones genéticas permiten determinar qué tan estable se mantiene el ranking genético, además de las posibilidades de realizar selección genética a una edad determinada. En el caso de este estudio, se muestran correlaciones altas entre los caracteres DAP- volumen comercial y entre la altura comercial - calidad. Además, las mayores correlaciones se muestran a los 34 meses de edad, donde el DAP y el volumen comercial presenta una correlación de 0.97, mientras que la altura comercial y el carácter calidad, reflejan una correlación genética de 0.74, valores superiores a 0.80 se obtuvieron cuando se correlaciona el DAP consigo mismo, también a los 34 meses.

Otro aspecto a mencionar es que la correlación entre las variables cuantitativas con la calidad del fuste, fueron en su mayoría muy bajas o incluso algunas negativas, a excepción de altura comercial, que correlaciono positivamente con la calidad, a los 22 y 34 meses de edad, por lo general, la tendencia es a obtener altas correlaciones entre las variables cuantitativas referidas a una misma edad (Pavlosky y Murillo, 2013).

El comportamiento obtenido en las correlaciones genéticas entre los caracteres permite establecer que la edad de 34 meses es la óptima para realizar selección,

fundamentado, también, en los valores de heredabilidad; sin embargo, es importante tener presente que entre mayor edad los coeficientes de los parámetros genéticos obtenidos pueden incrementar, suponiendo una mayor expresión genética del material clonal utilizado.

Ranking genético

Las diferencias entre clones se observan con mayor claridad a la hora de observar el ranking genético, referido a cualquiera de los caracteres evaluados. La figura 8 muestra la distribución de los clones de acuerdo con el carácter volumen comercial, a diferentes edades (10, 22 y 34 meses). El comportamiento a nivel de clones a lo largo del período de evaluación permite conocer la tendencia de algunos individuos a subir y otros a descender en el ranking genético, lo anterior producto de la expresión genética que van mostrando conforme aumenta la edad, donde algunos clones muestran superioridad genética y otros que por el contrario tienen a decaer en el ranking.

Al dividir el Ranking en grupos de clones de interés, de acuerdo con su posición, se diferencian un primer grupo, el cual está conformado por aquellos individuos que muestran un comportamiento superior a los demás clones, los cuales algunos se mantienen desde los 10 meses de edad hasta los 34 meses, como es el caso del clon 134, seguido por el 117, otros se mantienen en los primeros lugares a partir de los 22 meses, como el 136 y el 152. Los anteriores constituyen el grupo de clones con los cuales se garantiza una mayor ganancia genética, a la hora de hacer selección.

Otro grupo compuesto por clones que ocupan una posición intermedia, 110, 122, 139, 150, entre otros se muestran como opción para una potencial selección genética, donde el porcentaje de ganancia genética es menor al primer grupo, sin embargo, siempre se obtienen resultados mayores al promedio general. El tercer grupo de clones está constituido por aquellos individuos que siempre estuvieron dentro las últimas posiciones en el ranking genético, cuya ganancia genética será menor comparada con los demás clones del primero y segundo grupo; dentro de esta clasificación se encuentran el testigo, que siempre estuvo en la última posición del ranking genético, durante todo el período de evaluación, el clon 119, 140, 135, entre otros.

La utilidad práctica del ranking genético, además de que permite la proyección de potenciales ganancias genéticas, es que suele ser un indicador de cuándo realizar evaluaciones más prolongadas en el tiempo, con el objetivo de verificar cuáles son los clones elite, que se comportan con clara superioridad y de esta forma apoyar con mayor seguridad los programas de mejoramiento genético de la especie. Así como también permite conocer clones de rápido, mediano y lento crecimiento, que permitan direccionar los objetivos de producción forestal (Kumar, 2010).

Conclusiones

Los parámetros genéticos obtenidos para *Gmelina arborea* muestran valores de heredabilidad media del clon altos para las variables cuantitativas, que permiten suponer el potencial que tienen los programas de mejoramiento genético de la especie, el cual debe ser abordado de manera más integral, apoyado con estudios de propiedades de la madera, que permitan realizar una selección genética incluyendo diferentes variables, que se reflejan en la producción y en las características del producto final.

Existen clones estables, que se caracterizan por ubicarse en las primeras posiciones del ranking genético, que garantizan una mayor ganancia genética tanto en DAP, como en volumen comercial, que permiten consolidar los programas de mejoramiento genético de la especie. Específicamente, los clones 117, 134, 152 y 136 son los que mejor se ubican en el ranking genético, a diferencia de los clones 119, 140 y el testigo, que se ubicaron en las últimas posiciones.

La selección temprana es posible a partir de las estimaciones de los parámetros genéticos obtenidos en DAP y volumen comercial, y respaldados con las correlaciones genéticas, donde se refleja la edad de 34 meses como posible edad de selección, no obstante, es importante evaluar el material genético por mayor tiempo, para garantizar una selección definitiva, en vista de la variabilidad que se puede expresar conforme aumenta la edad y de los potenciales cambios en el ranking genético.

Específicamente las variables cuantitativas DAP y volumen comercial, junto con la calidad del fuste, mostraron mayor control genético, al presentar los valores más altos de los distintos parámetros genéticos evaluados.

Referencias bibliográficas

- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O. y Sandoval, C. (2015). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28). pp. 23-35.
- 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.
- Barrantes, A. R. y Ugalde, S. A. 2019. Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Oficina Nacional Forestal. Heredia, Costa Rica, 38 p.
- Chavarría, E. M. I. 2016. Reporte Estadístico Forestal 2014-2015. Sistema Nacional de Áreas de Conservación. San José, Costa Rica. 45 p.
- Foster, G.S., Shaw, D.V. 1988. Using clonal replicates to explore genetic variation in a perennial plant species. *Theor Appl Genet*, 76: 788–794.
- Kumar, A., Luna, R. K., Parveen, K. V. 2010. Variability in growth characteristics for different genotypes of *Eucalyptus tereticornis* (SM.). *Journal of Forestry Research*. N. 21 (4):87-491. Doi: 10.1007/s11676-010-0103-2
- Kumar, A. 2007. Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Silvae Genetica*. 56, 32-36.
- Mata, Ch. R., Castro, J. Ch. 2019. Geoportal de suelos de Costa Rica como Bien Público al Servicio del país. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32, abril 2019. pag. 51-56.
- Moya, R. 2004. *Gmelina arborea* en Costa Rica. *Bois et Forest Des Tropiques*. N. 279 (1). 47-57.
- Murillo, O., Meza, A., y 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, O. y Guevara, V. 2013. Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO, San José, Costa Rica. 159 pp.
- Pastrana, I., Espítia, M., y Murillo, O. 2012. Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *ACTA AGRONÓMICA*. 61(2), pp. 143-150.

- Pavlotzky, B. y Murillo, O. 2013. Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en San Carlos, Zona Norte de Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 10(24).
- Resende, M. D. V. 1995. Delineamento de experimentos de seleção para maximização da acurácia seletiva e do progresso genético. Revista Árvore, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 479-500.
- Resende, M. D. V. 2002. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Colombo: Embrapa Florestas. 975 p.
- Resende, M. D. V. 2007. SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas. 359 p.
- Salas, R. A. 2012. Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Tesis de licenciatura inédita). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Vencovsky, R., Barriga, P. 1992. Genética Biométrica no Fitomelhoramento. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 496 p.
- 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. San José, Costa Rica.
- Zimback, L., Mori, E. S., Brizolla, T. F., Chaves, R. 2011. Correlações entre caracteres silviculturais durante o crescimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Revista do Instituto Florestal, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 57-67.
- Zobel, B., Talbert, J. 1984. Applied forest tree improvement. New York: John Wiley & Sons, 496 p.

SÍNTESIS DE RESULTADOS

La investigación realizada con *Gmelina arborea* responde en principio a que se trata de la segunda especie más utilizada para la reforestación comercial en Costa Rica, lo que le da un valor agregado a la investigación y a los resultados obtenidos en este trabajo. Lo anterior en vista de que los alcances de dichos resultados tendrá repercusiones a nivel de sector forestal en la cadena de producción comercial de la especie, tanto a nivel de pequeños, medianos o inversionistas más grandes, siendo este uno de los propósitos más nobles del trabajo realizado. La melina se caracteriza por ser una especie de rápido crecimiento, con propiedades físico-mecánicas de la madera bastante favorables para su utilización y trabajabilidad, lo que la hace muy adecuada para la fabricación de muebles, utilización en la construcción y como materia prima para la construcción de embalajes o tarimas para la exportación de productos agrícolas.

El sector forestal en Costa Rica tiene su origen a finales de la década de los años 70's, el cual fue evolucionando hasta consolidarse, sobre todo en cuanto a definición de especies, manejo silvicultural, comercio e industrialización de la madera. Sin embargo, en la década de los años 80's y 90's, el componente de mejoramiento genético forestal se ha desarrollado de manera aislada, principalmente por iniciativa de empresas reforestadoras o instituciones como el CATIE, posteriormente a partir del año 2000 se retoma el mejoramiento genético bajo una estrategia de silvicultura clonal, que presupone un manejo más intensivo de las plantaciones forestales, producto de una rigurosa selección del material genético y bajo un estricto manejo silvicultural, que garantizara una mayor productividad por unidad de área.

Es a partir de esta más reciente etapa con un alto impacto del mejoramiento genético que se enmarca la investigación realizada en este trabajo, donde ya se cuenta con materiales genéticos seleccionados y que son ampliamente utilizados en la reforestación comercial en Costa Rica e incluso a nivel regional. El conocimiento generado producto de la investigación permite conocer el comportamiento de los conjuntos genéticos evaluados en distintas regiones del país, bajo diferentes regímenes de manejo, el cual se respalda con los resultados obtenidos en los diferentes ensayos genéticos de melina. Importante mencionar que se trabajó con clones de melina provenientes de diferentes empresas reforestadoras que tienen gran participación en el sector forestal, tanto a nivel de área plantada como en producción

de materia prima o madera, las cuales, ponen a disposición el material seleccionado y evaluado a los productores interesados.

Los resultados obtenidos responden algunos vacíos de información existentes en el área de mejoramiento genético clásico, tales como, determinación de parámetros genéticos para melina relacionados con las variables de crecimiento dasométricos, que permiten respaldar la toma de decisiones del genetista forestal a nivel de empresas u organizaciones relacionadas con el manejo intensivo de plantaciones forestales, de manera que lo que se busca es generar un paquete tecnológico para la especie melina que garantice mayores rendimientos, en el menor tiempo y al más bajo costo. Aspectos como ganancias genéticas en diámetro, altura comercial, volumen comercial y calidad, entre otros, son un indicador del mejoramiento genético, que a su vez tiene un efecto importante en la disminución de los turnos de corta o aprovechamiento potencian el desarrollo de plantaciones con la especie melina y la calidad de las mismas.

La experiencia desarrollada producto del trabajo de investigación y de los resultados obtenidos permitirá a nivel de empresas reforestadoras, principalmente, aquellas afiliadas a GENFORES direccionar estrategias de mejoramiento de acuerdo a los intereses particulares y de las condiciones edafoclimáticas imperantes en las zonas de impacto de cada empresa. El trabajo realizado es solo una parte de un integrado, que involucra otros aspectos técnicos que se complementan para generar el paquete tecnológico requerido para la especie, de acuerdo a las características propias de cada sitio de plantación.

Específicamente, a nivel de resultados concretos se generó información relacionada con la edad óptima de selección para melina en Costa Rica, producto de un análisis integrado de la información obtenida a partir de una serie de ensayos genéticos que fueron evaluados a diferentes edades, los cuales generaron suficientes datos de crecimiento para la estimación de parámetros genéticos de la especie, que permitieron definir el rango de edad óptimo para la selección de materiales o clones y de esta manera consolidar los programas de mejoramiento genético de melina que se tienen en el país. La definición de la edad de selección tiene la principal ventaja que permite seleccionar materiales (clones) que tienen un comportamiento diferenciado con características de interés económico, sin tener que esperar al turno

de rotación de la especie, acelerando los programas de mejoramiento genético y por lo tanto la disminución del tiempo para la obtención de los resultados de dichos programas.

La respuesta de los diferentes conjuntos genéticos a condiciones de suelo y clima permiten conocer cuáles son los clones que muestran un mejor comportamiento o adaptación a condiciones limitantes para el crecimiento de la especie, siendo este otro de los principales hallazgos obtenidos, dejando en evidencia que existen algunos clones con capacidad para adaptarse a suelos ácidos, que aunado a un buen programa de mantenimiento y manejo silvicultural responden positivamente. En este caso se evaluó una amplia gama de materiales, los cuales son utilizados en diferentes zonas del país para la reforestación comercial, dejando en evidencia la importancia y el impacto de los resultados obtenidos. En Costa Rica existen muchas diferencias a nivel de suelos, es posible encontrar dentro de una misma unidad productiva o finca, micrositios con características edáficas muy diferentes, en su mayoría suelos ácidos, poco profundos y deficiente drenaje, que limitan el crecimiento de la melina, por lo tanto, los resultados obtenidos en este sentido vienen a generar alternativas que permiten utilizar materiales genéticos con adaptación a condiciones extremas para el desarrollo de la especie.

El mejoramiento genético como un componente independiente dentro del manejo silvicultural de una especie forestal, por sí solo no genera mayores resultados, de manera que debe ir acompañado de una serie de procesos y técnicas silviculturales que permitan maximizar la producción. El conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera de melina es una de las áreas que estrictamente debe acompañar todo programa de mejoramiento genético, cuando de producción de madera en rollo se trata, como un complemento de todo el programa de producción. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que la melina produce madera con propiedades físico-mecánicas (peso específico básico, contracciones) que reflejan una estabilidad dimensional favorable, y tomando en cuenta aspectos de secado y calidad de la madera, reflejan el potencial que tiene la melina para la producción de los diversos productos forestales.

La estimación de parámetros genéticos permite direccionar el mejoramiento genético, además de evidenciar los alcances de los programas de mejoramiento genético, con

base al análisis específico de los diferentes componentes de la varianza, característicos de la especie en un sitio y clima determinado. El análisis de ensayos genéticos para la región Caribe de Costa Rica, generó información valiosa de clones de melina, que permiten realizar estimaciones de volumen comercial y las posibles ganancias genéticas que se pueden obtener, al compararlas con el material testigo utilizado en el país, evidenciando la importancia de realizar evaluaciones de los materiales en regiones con características ambientales diferentes.

Los resultados obtenidos de manera integral, producto de la investigación tienen gran valor e importancia para los programas de mejoramiento que se desarrollan en el país con la especie melina, sin embargo, dichos resultados responden solamente a uno de los componentes de toda una estrategia de mejoramiento genético para melina, ya que paralelamente se desarrollan investigaciones relacionadas con la tolerancia de clones a la enfermedad de la pudrición del tronco, manejo de germoplasma (polen) y cruces controlados entre genotipos con características de interés económico, que en conjunto potencian la reforestación con melina en Costa Rica y que respaldan la importancia de las investigación realizada para el manejo de la especie y para el sector forestal en general.

CONCLUSIONES GENERALES

Los parámetros genéticos obtenidos permiten direccionar la estrategia de mejoramiento genético con *Gmelina arborea*, que lidera GENFORES, enfocando su accionar en el establecimiento de plantaciones de alta productividad, mayor calidad de la madera y mayores rendimientos por unidad de área, a menor costo y en el menor tiempo posible.

Los resultados del análisis de las propiedades de la madera indican que *Gmelina arborea* es relativamente fuerte y rígida, es decir, presenta una estabilidad dimensional favorable, que respalda su calidad para ser utilizada en diversos usos y elaboración de diferentes productos, permitiendo conocer el potencial de mejora de la especie, principalmente en características como la densidad, el cual requiere de mayor investigación en vista de la variación que puede ocurrir a nivel clonal.

Las diferencias entre los estimados de los parámetros genéticos se deben a que, estos son específicos para cada sitio, región, clima y material genético evaluado, lo

cual se explica por las diferencias entre los crecimientos dasométricos encontrados en cada ensayo.

RECOMENDACIONES GENERALES

Continuar con la evaluación de los conjuntos genéticos analizados en este trabajo, que permita conocer la interacción genotipo-ambiente y de esta forma contar con el conocimiento sobre aquellos clones que presentan mayor versatilidad o adaptación a condiciones de sitio diferentes.

Realizar evaluaciones durante un período más prolongado de tiempo que permitan conocer el efecto de los raleos en el crecimiento y su efecto en los estimados de los parámetros genéticos en general, además de validar o confirmar la edad óptima de selección establecida con los resultados ya obtenidos en este trabajo.

Establecer ensayos genéticos en la región Pacífico Central o Pacífico Norte, con el objetivo de evaluar los conjuntos genéticos y su potencial adaptabilidad al cambio climático, tomando en cuenta las fluctuaciones en el clima los constantes cambios que se presentan en la actualidad.

Realizar ensayos genéticos con materiales que presenta algún grado de tolerancia a la pudrición del tronco de melina, como una medida para combatir la problemática actual que se presenta en una gran parte de las plantaciones de melina en Costa Rica.

160	141,36	12	7,88	F	G	H	I	J	K	L	M
129	143,21	16	6,83	F	G	H	I	J	K	L	M
143	144,20	14	7,30	F	G	H	I	J	K	L	M
141	146,72	12	7,88		G	H	I	J	K	L	M
161	149,09	12	7,88			H	I	J	K	L	M
157	149,22	12	7,88			H	I	J	K	L	M
151	151,34	16	6,83				I	J	K	L	M
162	151,94	16	6,83				I	J	K	L	M
110	152,27	13	7,58				I	J	K	L	M
149	155,02	12	7,88					J	K	L	M
128	155,21	10	8,64					J	K	L	M
139	155,66	12	7,88					J	K	L	M
164	155,92	12	7,88					J	K	L	M
140	157,56	16	6,83					J	K	L	M
133	157,74	10	8,64					J	K	L	M
159	160,76	12	7,88						K	L	M
109	164,65	11	8,24							L	M
138	176,14	12	7,88								M

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 2. Análisis de la varianza de densidad verde de la madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Densidad verde	696	0,23	0,16	10,92

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,01	53	0,04	3,56	<0,0001
Clon	2,01	53	0,04	3,56	<0,0001
Error	6,83	642	0,01		
Total	8,84	695			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,16719

Error: 0,0106 gl: 642

Clon	Medias	n	E.E.						
115	0,79	10	0,03	A					
120	0,82	12	0,03	A	B				
124	0,84	12	0,03	A	B	C			
163	0,84	12	0,03	A	B	C			
112	0,85	12	0,03	A	B	C	D		
119	0,87	10	0,03	A	B	C	D	E	
125	0,88	10	0,03	A	B	C	D	E	
132	0,88	16	0,03	A	B	C	D	E	
147	0,88	16	0,03	A	B	C	D	E	
137	0,89	12	0,03	A	B	C	D	E	
127	0,89	12	0,03	A	B	C	D	E	
133	0,90	10	0,03	A	B	C	D	E	
123	0,91	18	0,02	A	B	C	D	E	
130	0,91	12	0,03	A	B	C	D	E	
150	0,91	12	0,03	A	B	C	D	E	
117	0,92	12	0,03	A	B	C	D	E	

111	0,92	12	0,03	A	B	C	D	E
155	0,92	12	0,03	A	B	C	D	E
118	0,92	12	0,03	A	B	C	D	E
152	0,93	24	0,02	A	B	C	D	E
136	0,94	12	0,03	A	B	C	D	E
113	0,94	12	0,03	A	B	C	D	E
114	0,95	10	0,03	A	B	C	D	E
145	0,95	12	0,03	A	B	C	D	E
129	0,95	16	0,03	A	B	C	D	E
164	0,95	12	0,03	A	B	C	D	E
122	0,95	12	0,03	A	B	C	D	E
126	0,95	10	0,03	A	B	C	D	E
134	0,95	20	0,02	A	B	C	D	E
121	0,95	16	0,03	A	B	C	D	E
T	0,96	16	0,03	A	B	C	D	E
131	0,96	8	0,04		B	C	D	E
161	0,97	12	0,03		B	C	D	E
144	0,97	14	0,03		B	C	D	E
110	0,97	13	0,03		B	C	D	E
143	0,97	14	0,03		B	C	D	E
151	0,97	16	0,03		B	C	D	E
146	0,97	12	0,03		B	C	D	E
159	0,98	12	0,03		B	C	D	E
109	0,98	11	0,03		B	C	D	E
154	0,99	12	0,03		B	C	D	E
149	0,99	12	0,03		B	C	D	E
162	0,99	16	0,03		B	C	D	E
148	0,99	12	0,03			C	D	E
138	1,00	12	0,03			C	D	E
160	1,01	12	0,03				D	E
128	1,01	10	0,03				D	E
139	1,01	12	0,03				D	E
141	1,01	12	0,03				D	E
116	1,01	14	0,03				D	E
158	1,02	12	0,03					E
140	1,02	16	0,03					E
142	1,02	14	0,03					E
157	1,03	12	0,03					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Anexo 3. Análisis de la varianza del peso específico de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso específico básico	627	0,34	0,28	13,95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,04	53	0,02	5,67	<0,0001
Clon	1,04	53	0,02	5,67	<0,0001
Error	1,98	573	3,5E-03		
Total	3,02	626			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,10271

Error: 0,0035 gl: 573

Clon	Medias	n	E.E.						
109	0,37	11	0,02	A					
159	0,38	12	0,02	A					
119	0,38	10	0,02	A					
138	0,38	11	0,02	A	B				
120	0,38	11	0,02	A	B				
123	0,39	18	0,01	A	B				
147	0,39	16	0,01	A	B				
110	0,39	13	0,02	A	B				
151	0,39	16	0,01	A	B				
150	0,39	12	0,02	A	B				
164	0,39	11	0,02	A	B				
149	0,39	12	0,02	A	B				
161	0,39	12	0,02	A	B				
133	0,39	8	0,02	A	B				
129	0,39	16	0,01	A	B				
162	0,40	16	0,01	A	B				
128	0,40	10	0,02	A	B				
137	0,40	12	0,02	A	B				
139	0,40	12	0,02	A	B				
130	0,40	12	0,02	A	B				
124	0,40	12	0,02	A	B				
111	0,41	11	0,02	A	B	C			
122	0,41	12	0,02	A	B	C			
126	0,41	10	0,02	A	B	C			
114	0,41	9	0,02	A	B	C			
118	0,42	12	0,02	A	B	C	D		
157	0,42	12	0,02	A	B	C	D		
163	0,42	10	0,02	A	B	C	D		
143	0,42	13	0,02	A	B	C	D		
140	0,42	15	0,02	A	B	C	D		
112	0,42	12	0,02	A	B	C	D	E	
141	0,42	12	0,02	A	B	C	D	E	
160	0,42	12	0,02	A	B	C	D	E	
113	0,42	12	0,02	A	B	C	D	E	
T	0,42	15	0,02	A	B	C	D	E	F
145	0,43	12	0,02	A	B	C	D	E	F
136	0,43	12	0,02	A	B	C	D	E	F
155	0,43	12	0,02	A	B	C	D	E	F

158	0,43	12	0,02	A	B	C	D	E	F	
131	0,44	7	0,02	A	B	C	D	E	F	G
116	0,44	14	0,02	A	B	C	D	E	F	G
146	0,44	12	0,02	A	B	C	D	E	F	G
117	0,44	9	0,02	A	B	C	D	E	F	G
144	0,45	14	0,02	A	B	C	D	E	F	G
115	0,45	7	0,02	A	B	C	D	E	F	G
127	0,46	11	0,02	A	B	C	D	E	F	G H
134	0,48	18	0,01		B	C	D	E	F	G H
142	0,50	8	0,02			C	D	E	F	G H
154	0,51	10	0,02				D	E	F	G H
148	0,52	4	0,03				D	E	F	G H
132	0,52	9	0,02					E	F	G H
125	0,53	7	0,02						F	G H
152	0,54	14	0,02							G H
121	0,55	5	0,03							H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 4. Análisis de la Varianza de la contracción tangencial de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cont. Tangencial	148	0,33	0,00	62,24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	38,64	54	0,72	0,85	0,7330
Clon	38,64	54	0,72	0,85	0,7330
Error	77,89	93	0,84		
Total	116,52	147			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=3,48418

Error: 0,8375 gl: 93

Clon Medias n E.E.

130	0,58	3	0,53	A
160	0,65	2	0,65	A
143	0,67	3	0,53	A
145	0,76	2	0,65	A
118	0,78	3	0,53	A
114	0,86	2	0,65	A
121	0,90	4	0,46	A
146	0,97	3	0,53	A
159	0,98	2	0,65	A
111	0,98	3	0,53	A
140	0,98	4	0,46	A
163	0,98	3	0,53	A
162	1,05	3	0,53	A
158	1,08	1	0,92	A
137	1,10	3	0,53	A
161	1,12	2	0,65	A
133	1,24	2	0,65	A
154	1,24	3	0,53	A
144	1,26	3	0,53	A

148	1,27	3	0,53	A
147	1,33	4	0,46	A
150	1,37	2	0,65	A
122	1,38	2	0,65	A
109	1,42	3	0,53	A
128	1,42	2	0,65	A
138	1,42	3	0,53	A
142	1,50	3	0,53	A
136	1,51	3	0,53	A
110	1,54	3	0,53	A
139	1,55	2	0,65	A
134	1,55	3	0,53	A
127	1,55	3	0,53	A
164	1,57	3	0,53	A
112	1,58	3	0,53	A
157	1,59	3	0,53	A
149	1,61	3	0,53	A
T	1,63	3	0,53	A
152	1,63	5	0,41	A
123	1,67	4	0,46	A
120	1,67	3	0,53	A
R	1,70	1	0,92	A
132	1,71	2	0,65	A
155	1,71	3	0,53	A
131	1,74	2	0,65	A
129	1,82	2	0,65	A
151	1,83	4	0,46	A
124	1,95	3	0,53	A
116	2,05	2	0,65	A
126	2,10	2	0,65	A
117	2,25	2	0,65	A
113	2,43	3	0,53	A
141	2,58	3	0,53	A
125	2,90	2	0,65	A
119	2,97	2	0,65	A
115	3,06	1	0,92	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Análisis de la Varianza de la contracción Radial de madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cont. Radial	130	0,39	0,00	95,38

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	120,91	53	2,28	0,90	0,6562
Clon	120,91	53	2,28	0,90	0,6562
Error	192,85	76	2,54		
Total	313,76	129			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=6,78622

Error: 2,5374 gl: 76

Clon	Medias	n	E.E.
160	0,52	1	1,59 A
157	0,55	2	1,13 A
141	0,62	1	1,59 A
128	0,63	1	1,59 A
112	0,64	1	1,59 A
127	0,72	3	0,92 A
130	0,84	2	1,13 A
162	0,86	3	0,92 A
144	0,86	2	1,13 A
113	0,89	3	0,92 A
148	0,92	2	1,13 A
150	0,94	3	0,92 A
110	0,96	3	0,92 A
119	1,01	2	1,13 A
121	1,03	4	0,80 A
117	1,07	3	0,92 A
149	1,08	3	0,92 A
163	1,08	1	1,59 A
140	1,12	4	0,80 A
109	1,12	2	1,13 A
125	1,13	1	1,59 A
159	1,17	2	1,13 A
122	1,18	2	1,13 A
126	1,20	2	1,13 A
118	1,20	2	1,13 A
134	1,25	3	0,92 A
154	1,27	3	0,92 A
155	1,27	2	1,13 A
143	1,30	1	1,59 A
136	1,30	2	1,13 A
120	1,30	2	1,13 A
115	1,37	1	1,59 A
133	1,39	2	1,13 A
123	1,39	3	0,92 A
145	1,40	3	0,92 A
114	1,48	2	1,13 A
142	1,64	2	1,13 A
131	1,64	2	1,13 A

129	1,67	4	0,80	A
138	1,68	3	0,92	A
146	1,70	3	0,92	A
164	1,75	3	0,92	A
116	1,84	1	1,59	A
T	1,92	4	0,80	A
161	1,95	1	1,59	A
111	2,36	3	0,92	A
158	2,63	3	0,92	A
152	2,81	5	0,71	A
139	3,00	2	1,13	A
124	3,15	3	0,92	A
147	3,42	3	0,92	A
132	3,93	4	0,80	A
151	3,95	4	0,80	A
137	5,80	1	1,59	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 6. Análisis de la Varianza de la contracción volumétrica de madera de melina de 3 años de edad, zona Atlántica, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cont. volumétrica	650	0,36	0,30	35,51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1434,57	53	27,07	6,30	<0,0001
Clon	1434,57	53	27,07	6,30	<0,0001
Error	2560,25	596	4,30		
Total	3994,82	649			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=3,51018

Error: 4,2957 gl: 596

Clon Medias n E.E.

132	3,10	16	0,52	A							
148	3,16	10	0,66	A							
121	3,29	15	0,54	A	B						
152	3,58	21	0,45	A	B	C					
131	3,93	7	0,78	A	B	C	D				
142	3,96	13	0,57	A	B	C	D				
144	3,96	14	0,55	A	B	C	D				
154	4,04	12	0,60	A	B	C	D				
117	4,14	10	0,66	A	B	C	D				
127	4,18	10	0,66	A	B	C	D				
155	4,22	10	0,66	A	B	C	D				
124	4,34	10	0,66	A	B	C	D				
T	4,62	16	0,52	A	B	C	D	E			
125	4,66	10	0,66	A	B	C	D	E	F		
160	4,88	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	
158	5,15	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
122	5,16	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
116	5,23	14	0,55	A	B	C	D	E	F	G	H

146	5,23	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
141	5,35	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
134	5,37	18	0,49	A	B	C	D	E	F	G	H
126	5,56	9	0,69	A	B	C	D	E	F	G	H
110	5,59	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
157	5,72	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
112	5,73	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
161	5,78	11	0,62	A	B	C	D	E	F	G	H
140	5,83	15	0,54	A	B	C	D	E	F	G	H
145	6,08	11	0,62	A	B	C	D	E	F	G	H
130	6,13	11	0,62	A	B	C	D	E	F	G	H
163	6,15	11	0,62	A	B	C	D	E	F	G	H
162	6,21	16	0,52	A	B	C	D	E	F	G	H
133	6,26	6	0,85	A	B	C	D	E	F	G	H
111	6,35	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
136	6,56	12	0,60	A	B	C	D	E	F	G	H
139	6,68	12	0,60		B	C	D	E	F	G	H
137	6,69	10	0,66		B	C	D	E	F	G	H
118	6,72	12	0,60		B	C	D	E	F	G	H
138	6,77	11	0,62		B	C	D	E	F	G	H
164	6,81	10	0,66			C	D	E	F	G	H
159	6,86	12	0,60			C	D	E	F	G	H
150	6,87	11	0,62			C	D	E	F	G	H
120	6,89	11	0,62			C	D	E	F	G	H
109	7,10	11	0,62				D	E	F	G	H
151	7,26	16	0,52				D	E	F	G	H
128	7,26	10	0,66				D	E	F	G	H
129	7,31	16	0,52				D	E	F	G	H
113	7,90	12	0,60					E	F	G	H
143	7,97	14	0,55					E	F	G	H
115	8,01	6	0,85					E	F	G	H
114	8,05	9	0,69					E	F	G	H
123	8,13	17	0,50						F	G	H
119	8,15	10	0,66						F	G	H
149	8,38	12	0,60							G	H
147	8,56	12	0,60								H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 7. Análisis de la varianza de la relación R/T de madera de melina de 3 años de edad, Zona Atlántica de Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Relación T/R	117	0,42	0,00	83,82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	52,34	53	0,99	0,85	0,7223
Clon	52,34	53	0,99	0,85	0,7223
Error	72,90	63	1,16		
Total	125,24	116			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=4,79332

Error: 1,1572 gl: 63

Clon	Medias	n	E.E.
137	0,20	1	1,08 A
158	0,23	1	1,08 A
163	0,36	1	1,08 A
145	0,54	2	0,76 A
147	0,55	3	0,62 A
143	0,56	1	1,08 A
128	0,58	1	1,08 A
114	0,60	2	0,76 A
118	0,63	2	0,76 A
151	0,68	4	0,54 A
159	0,83	2	0,76 A
160	0,84	1	1,08 A
111	0,86	3	0,62 A
130	0,90	2	0,76 A
121	0,95	3	0,62 A
129	0,95	2	0,76 A
133	0,96	2	0,76 A
142	0,98	2	0,76 A
154	0,99	3	0,62 A
161	1,00	1	1,08 A
132	1,01	2	0,76 A
146	1,01	3	0,62 A
140	1,03	3	0,62 A
138	1,04	3	0,62 A
123	1,04	3	0,62 A
T	1,06	3	0,62 A
131	1,07	2	0,76 A
150	1,11	2	0,76 A
152	1,12	5	0,48 A
139	1,13	2	0,76 A
125	1,22	1	1,08 A
122	1,23	2	0,76 A
136	1,23	2	0,76 A
144	1,23	2	0,76 A
124	1,26	3	0,62 A
120	1,27	2	0,76 A
109	1,29	2	0,76 A
162	1,34	3	0,62 A

149	1,39	3	0,62	A
155	1,47	2	0,76	A
164	1,53	3	0,62	A
148	1,62	2	0,76	A
134	1,72	2	0,76	A
126	1,75	2	0,76	A
110	1,76	3	0,62	A
116	1,90	1	1,08	A
117	1,94	2	0,76	A
127	2,15	3	0,62	A
115	2,24	1	1,08	A
141	2,47	1	1,08	A
157	2,83	2	0,76	A
112	2,84	1	1,08	A
119	2,93	2	0,76	A
113	3,71	3	0,62	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 8. Ubicación de ensayos clonales El Porvenir y La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

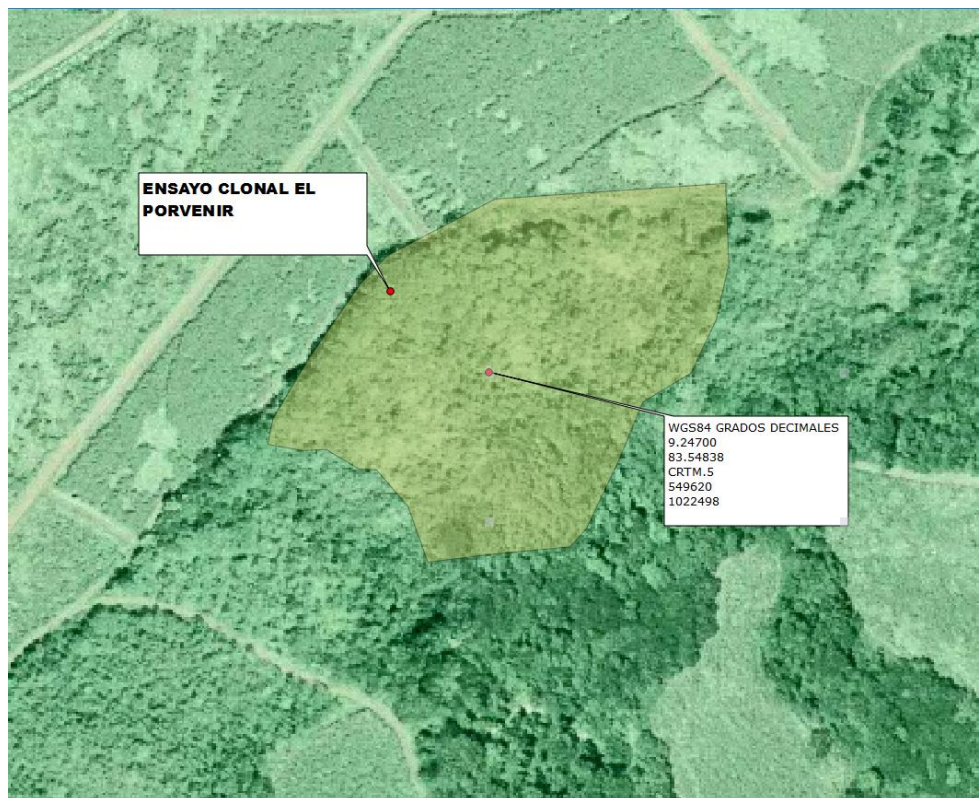


Figura 1. Ensayo El Porvenir, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica

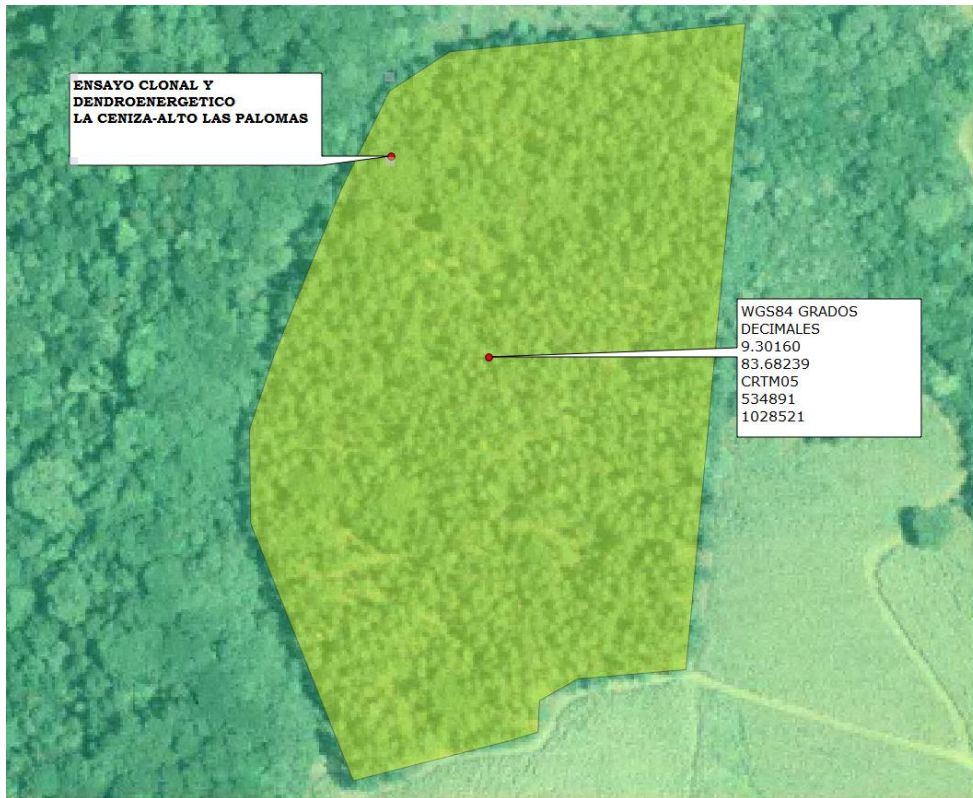


Figura 2. Ensayo La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Anexo 9. Imágenes de ensayo clonal de Cariari, Pococí, zona Atlántica de Costa Rica.



Figura 1. Ensayo clonal, Cariari de Pococí, Limón, zona Atlántica de Costa Rica.



Figura 2. Ensayo clonal de Cariari, Pococí, provincia de Limón, Costa Rica.

Anexo 10. Imagenes de ensayo clonal La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.



Figura 1. Ensayo clonal La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.



Figura 2. Ensayo clonal La Ceniza, Pérez Zeledón, zona sur de Costa Rica.

Anexo 11. Croquis del ensayo clonal de Gmelina arborea localizado en Siquirres, provincia de Limón

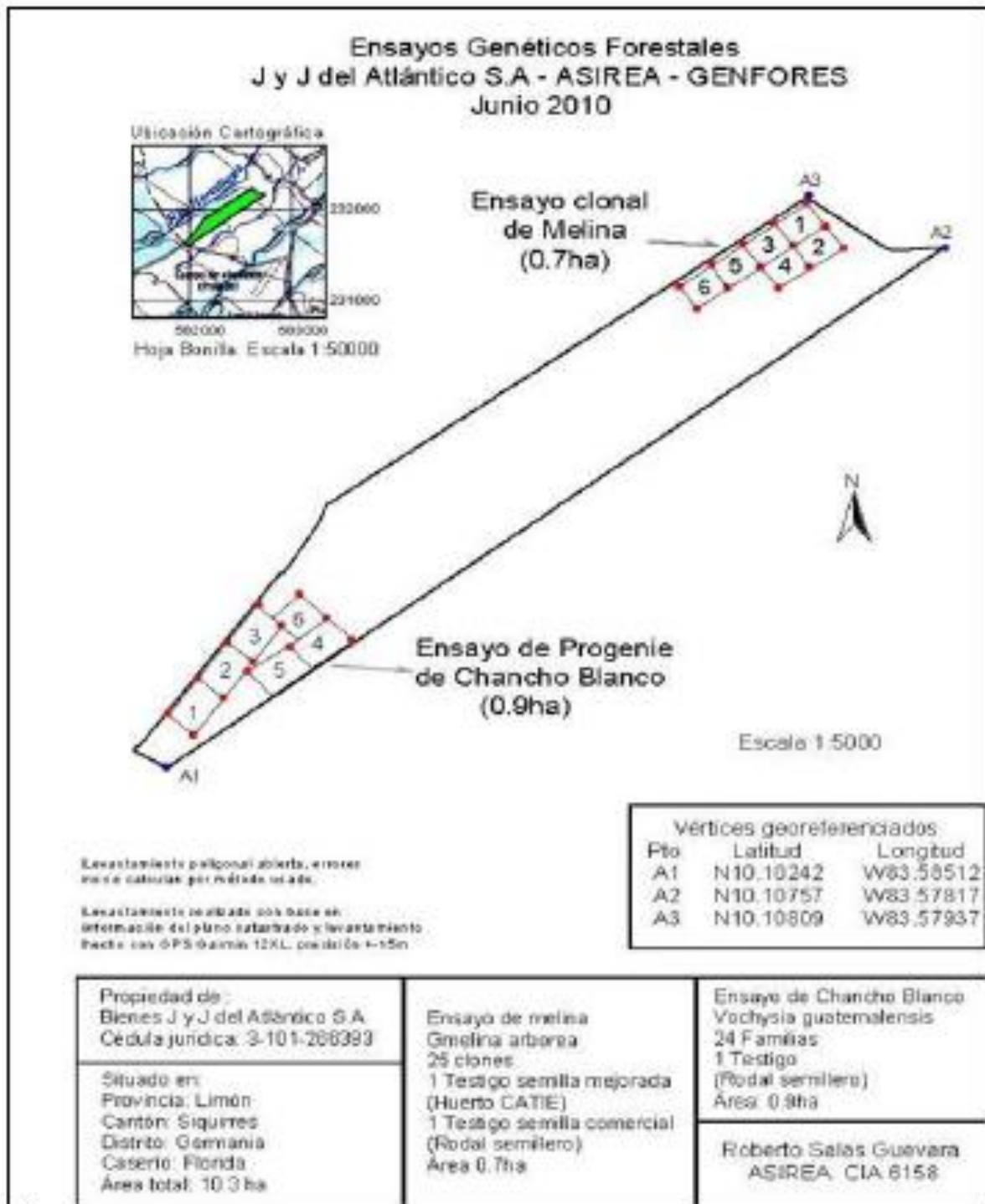


Figura 1. Ubicación geográfica de ensayo de Siquirres, Limón.

