

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DE CLONES DE TECA (*Tectona
grandis* Linn. F.) EN COSTA RICA Y NICARAGUA.**

MAIKOL ALBERTO CHAVES VÁSQUEZ

CARTAGO, COSTA RICA

2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DE CLONES DE TECA (*Tectona
grandis* Linn. F.) EN COSTA RICA Y NICARAGUA.**

MAIKOL ALBERTO CHAVES VÁSQUEZ

CARTAGO, COSTA RICA

2017



COMPORTAMIENTO DE CLONES DE TECA (*Tectona grandis* Linn. F.) EN COSTA RICA Y NICARAGUA.

Maikol Alberto Chaves Vásquez*

RESUMEN

En el primer capítulo se presenta la evaluación de dos ensayos clonales de tecla en Guanacaste, Costa Rica, donde se analizó el comportamiento de 49 genotipos a una edad de 4 años. Cada clon estuvo representado por 24 rametos, distribuidos aleatoriamente en 6 bloques. Por medio del software SELEGEN, se obtuvo valores de heredabilidad media clonal de 0,80, 0,80 y 0,81 para el DAP, número de ramas totales y volumen comercial respectivamente. La correlación genética entre localidades en las variables número de ramas, DAP y volumen comercial registró un $r=0,91$, $0,89$ y $0,88$, que indican una baja relación genotipo x ambiente para esta población clonal en estas dos localidades. Si se seleccionan los mejores 10 genotipos se estima que se obtendrá una ganancia genética en DAP de 14,05%; que permitirá reducir el turno de cosecha en 2,5 años. Mientras que la ganancia genética del volumen comercial se estima en 34,70%.

En el segundo capítulo se presenta los resultados de dos ensayos clonales plantados a 1,5 m x 1,5 m y 3 m x 3 m en Siuna, RAAN, en Nicaragua. El volumen total registró heredabilidad media por procedencia (empresa) de 0,76 y 0,77 para los ensayos de baja y alta densidad respectivamente. Los genotipos de Malasia registraron diferencias superiores significativas en el volumen total, con respecto a todos los clones de Costa Rica.

El tercer capítulo presenta la evaluación de siete ensayos clonales de tecla en Costa Rica y Nicaragua. La correlación genética para los siete ensayos fue de $r=0,14$, $0,16$, $0,22$, $0,27$, $0,34$, $0,39$ y $0,42$ para los caracteres número de ramas, calidad del tronco, volumen total, presencia de rama gruesa, DAP, altura total y estado fitosanitario, respectivamente, que implica una alta interacción genotipo x ambiente.

Palabras clave: *Tectona grandis*, Ensayos clonales, Costa Rica, Interacción genotipo x ambiente.

ABSTRACT

The first chapter presents the evaluation of two clonal teak trials in Guanacaste, Costa Rica, where the behavior of 49 genotypes at an age of 4 years was analyzed. Each clone was represented by 24 repetitions, randomly distributed in 6 blocks. Through the SELEGEN software, mean clonal heritability values of 0.80, 0.80 and 0.81 were obtained for the DBH, number of total branches and commercial volume, respectively. The genetic correlation between localities in the variable number of branches, DBH and commercial volume registered $r = 0.91$, 0.89 and 0.88 , indicating a low genotype x environment for this clonal population in these two locations. If the best 10 genotypes are selected, it is estimated that a genetic gain in DBH of 14,05% will be obtained; that will allow to reduce the harvest turn in 2.5 years. While the genetic gain of commercial volume is estimated at 34.70%.

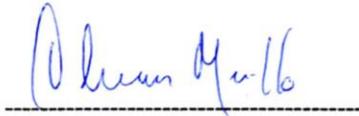
The second chapter presents the results of two clonal trials planted at 1.5 m x 1.5 m and 3 m x 3 m in Siuna, RAAN, in Nicaragua. The total volume registered average heritability by origin (company) of 0.76 and 0.77 for the low and high density tests, respectively. The genotypes of Malaysia registered significant differences in total volume, with respect to all the Costa Rican clones.

The third chapter presents the evaluation of seven clonal teak trials in Costa Rica and Nicaragua. The genetic correlation for the seven trials was $r = 0.14$, 0.16 , 0.22 , 0.27 , 0.34 , 0.39 and 0.42 for the number of branches, trunk quality, total volume, presence of thick branch, DBH, total height and phytosanitary status, respectively, which implies a high interaction genotype x environment.

Key words: *Tectona grandis*, Clonal assays, Costa Rica, Genotype x environment interaction.

*Chaves, M. (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn. F.) en Costa Rica y Nicaragua*. Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica.

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Olman Murillo Gamboa, M.Sc. Yorlery Badilla Valverde y M.Sc. William Hernández Castro, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Olman Murillo Gamboa, Ph.D.
Director de tesis



Yorlery Badilla Valverde, M.Sc.
Lectora



William Hernández Castro, M.Sc.
Lector



Dorian Carvajal Vanegas
Coordinador Trabajos Finales de
Graduación



Maikol Alberto Chaves Vásquez
Estudiante

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Olman Murillo, quién me aceptó como estudiante de tesis y me permitió aprender mucho sobre este tema de mejoramiento genético. Gracias por expresar su conocimiento de una forma tan amena, lo cual me permitió desarrollar este documento.

A Yorleny Badilla por creer en mí y en mis capacidades, le agradezco haberme tomado en consideración para la realización de este gran trabajo.

Ambos, tanto Olman como Yorleny son grandes personas cuya humildad los caracteriza y estoy sumamente agradecido por haberlos tenido como mis tutores.

Agradezco también a la empresa Novelteak por el aporte económico en la realización de este trabajo y a todos los involucrados en el área de mejoramiento de esta empresa, los cuales me permitieron realizar esta labor de la mejor forma.

También a la empresa MLR Forestal y a los encargados por permitirme una estadía placentera durante la labor de campo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL	10
Capítulo 1: Interacción genotipo x ambiente en ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i> Linn. F.) a los 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.....	12
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
RESULTADOS.....	22
DISCUSIÓN	31
CONCLUSIONES	38
REFERENCIAS.....	39
Capítulo 2: Evaluación de ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i> Linn. F.) a diferente densidad de siembra en Siuna, RAAN, Nicaragua.....	41
RESUMEN	41
ABSTRACT	42
INTRODUCCIÓN	43
MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
RESULTADOS.....	51
DISCUSIÓN	76
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS.....	86
Capítulo 3: Evaluación de siete ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i> Linn. F.) en Costa Rica y Nicaragua.....	89

RESUMEN	89
ABSTRACT	90
INTRODUCCIÓN	91
MATERIALES Y MÉTODOS	93
RESULTADOS.....	100
DISCUSIÓN	110
CONCLUSIONES	116
REFERENCIAS.....	117
Anexo 1. Heredabilidad media clonal y valor de exactitud en el DAP y el volumen total para siete ensayos clones de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua (valores respuesta únicamente con el material genético que coincide entre los ensayos).....	120

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación espacial de dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> de 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.....	17
Cuadro 2. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).	19
Cuadro 3. Parámetros genéticos en dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> a los 4 años de edad en Guanacaste de Costa Rica.....	23
Cuadro 4. Matriz de correlaciones genéticas para los caracteres analizados en dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica.	27
Cuadro 5. Parámetros genéticos por empresa para un ensayo de <i>Tectona grandis</i> a los 4 años de edad en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica.	28
Cuadro 6. Parámetros genéticos por empresa para un ensayo de <i>Tectona grandis</i> a los 4 años de edad en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.	29
Cuadro 7. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).	48
Cuadro 8. Parámetros genéticos para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	52
Cuadro 9. Parámetros genéticos para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	54
Cuadro 10. Parámetros genéticos para dos ensayos de <i>Tectona grandis</i> plantados a diferente densidad a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.....	57

Cuadro 11. Parámetros genéticos para un ensayo de <i>Tectona grandis</i> plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).....	60
Cuadro 12. Parámetros genéticos para un ensayo de <i>Tectona grandis</i> plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).....	61
Cuadro 13. Parámetros genéticos obtenidos para dos ensayos de <i>Tectona grandis</i> plantados a diferente densidad a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).	62
Cuadro 14. Comparación de los parámetros genéticos por empresa para el volumen total (m ³) en dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> con diferente densidad de siembra a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (con y sin el material DR).....	66
Cuadro 15. Parámetros genéticos obtenidos para el DAP, a los 13 y 22 meses de edad en dos ensayos clonales de teca a diferente densidad de siembra en Siuna, RAAN, Nicaragua.	70
Cuadro 16. Ubicación espacial y edad de siete ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua.....	94
Cuadro 17. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).	98
Cuadro 18. Parámetros genéticos para 4 ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i>) en Costa Rica y Nicaragua (agrupación caribe).	101
Cuadro 19. Parámetros genéticos para 3 ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i>) en Costa Rica (agrupación pacífico).....	102
Cuadro 20. Parámetros genéticos para siete ensayos clonales de teca (<i>Tectona grandis</i>) en Costa Rica y Nicaragua.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> de 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.....	16
Figura 2. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.	18
Figura 3. Ranking genético distribuido en tercios, del volumen comercial en dos ensayos clonales de teca a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica. TCA corresponde al material testigo (semilla mejorada de huerto semillero).....	25
Figura 4. Ranking genético para el volumen comercial (m ³) en dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica.....	27

Figura 5. Ranking genético del volumen comercial por empresa en un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> L.f, a los 4 años de edad, en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica.	30
Figura 6. Ranking genético del volumen comercial por empresa en un ensayo clonal de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f), a los 4 años de edad, en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.	30
Figura 7. Localización de dos ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> de 22 meses de edad establecidos en Nicaragua.	45
Figura 8. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.	47
Figura 9. Ranking genético del volumen total (m ³) para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	55
Figura 10. Ranking genético del volumen total (m ³) para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 3 m x 3 m, a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	55
Figura 11. Ranking genético para el volumen total (m ³) a los 22 meses de edad en dos ensayos clonales de teca, a diferente densidad de siembra, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	59
Figura 12. Ranking genético para el volumen total (m ³) en dos ensayos clonales GENFORES de teca, a diferente densidad de siembra con 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	63
Figura 13. Ranking genético para el volumen total (m ³) en un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).	65
Figura 14. Ranking genético para el volumen total (m ³) para un ensayo clonal de <i>Tectona grandis</i> plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).	65
Figura 15. Ranking genético del volumen total de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	67
Figura 16. Ranking genético del volumen total teca (<i>Tectona grandis</i> L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.	67
Figura 17. Ranking genético del volumen total de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).	68

Figura 18. Ranking genético del volumen total de teca (<i>Tectona grandis</i> L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).....	68
Figura 19. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 13 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua....	71
Figura 20. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua....	71
Figura 21. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, a los 13 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.	72
Figura 22. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, a los 22 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.	72
Figura 23. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, en dos periodos, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.	74
Figura 24. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, en dos periodos, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.	75
Figura 25. Localización de siete ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua.	93
Figura 26. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.	97
Figura 27. Ranking genético para el volumen total (m ³) en 4 ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua (agrupación caribe).	104
Figura 28. Ranking genético para el volumen total (m ³) en 3 ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica (agrupación pacífico).....	104
Figura 29. Ranking genético para el volumen total (m ³) en siete ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua.	107
Figura 30. Ranking genético, para el volumen total presentando en tercios según su valor genético para siete ensayos clonales de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua.	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Heredabilidad media clonal y valor de exactitud en el DAP y el volumen total para siete ensayos clones de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica y Nicaragua (valores respuesta únicamente con el material genético que coincide entre los ensayos).....	119
---	-----

INTRODUCCIÓN GENERAL

La teca (*Tectona grandis* Linn. F.) es un árbol latifoliado que pertenece a la familia *Lamiaceae* y originaria del sureste asiático, de las regiones de Myanmar, la India, Tailandia y la República Democrática Popular de Laos, entre los 12 y 25° latitud Norte y de 73 a 104° longitud Este (Espitia, Murillo, y Castillo, 2011).

Requiere una temperatura media entre 22 y 28 °C, una precipitación media de 1250 a 2500 mm anuales, además de tres a cinco meses de temporada seca. Se adapta a gran cantidad de suelos, prefiriendo suelos aluviales de textura franco-arenosa o arcillosa, fértiles, profundos y bien drenados, con pH neutro o ácido y terrenos planos (Muñoz, Coria, García, y Balam, 2009).

Esta especie es muy apetecida a nivel internacional por las propiedades que presenta la madera: fuerte, durable, estabilidad dimensional, buena trabajabilidad y dureza, resistente a las termitas, productos químicos, hongos e intemperie; se utiliza en gran variedad de usos entre ellos; mueblería, elementos estructurales y pisos, además se emplea en uso marino y es ideal para utilizar en ambientes húmedos (Camino y Morales, 2013).

El gran mercado consumidor de madera de teca es la India, esta especie es altamente usada en la construcción de casas de habitación y elementos estructurales, por este motivo la compra de la teca en América Latina en su gran mayoría es manejada por intermediarios indios. Aún con el volumen de madera proveniente de América Latina, se cree que existe una demanda insatisfecha y existe la necesidad de extender los cultivos de teca para suplir este mercado (Camino y Morales, 2013).

La extensión de las plantaciones de teca debe ir en aumento, pero este incremento de terreno reforestado no debe ser visto únicamente como mayores volúmenes de biomasa. El futuro de la silvicultura de la teca debe ir acompañado de prácticas adecuadas que permitan mayor calidad y madera por unidad de terreno, es por este motivo que muchos países han decidido invertir en mejoramiento genético en busca

de materiales superiores que permitan la optimización del recurso (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013).

Al año 2000 se introdujo en Brasil material genético clonal procedente del Programa de Mejoramiento Genético de teca en Sabah, Malasia insular, gran cantidad de este material se reprodujo de forma masiva y se propagó en gran parte de América Latina (Camino & Morales, 2013).

En el caso de Costa Rica, en los años 90 algunas empresas reforestadoras iniciaron programas de mejoramiento genético a escala comercial para la teca, se establecieron los primeros huertos semilleros de la región, que trajo aumentos de aproximadamente un 20 % en el volumen comercial y 25 % en el número de árboles por hectárea de calidad maderable (Salas, 2012).

El mejoramiento clonal; más recientemente evolucionó hacia la búsqueda de material genético que mejor se adapte a cada zona de desarrollo, incrementando la productividad mediante el uso de clones específicos. Es por esto que, el establecimiento de ensayos clonales en diferentes condiciones climáticas y edáficas es vital para la comprobación de la superioridad genética. Además, permite la identificación de aquellos árboles candidatos para una segunda generación que mediante cruces controlados ofrecen una ganancia genética significativa a través de la selección en generaciones futuras (Cornelius, Mesén, y Corea, 1994).

Evaluar la adaptación de clones según el ambiente donde se encuentre permite definir la estabilidad que presentan estos materiales y por lo tanto la interacción genotipo-ambiente (Vega, 1990). La clara identificación del rendimiento de cada material clonal acorde al ambiente donde se desarrolla permite integrar o separar programas de mejoramiento genético con base en la respuesta de los clones a las condiciones ambientales específicas (Cornelius, Mesén, y Corea, 1994).

El presente estudio estableció como objetivo general evaluar caracteres en ocho ensayos clonales de *Tectona grandis* establecidos en Costa Rica y Nicaragua.

Capítulo 1

Interacción genotipo x ambiente en ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) a los 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.

RESUMEN

Se presenta la evaluación de dos ensayos clonales de *Tectona grandis* Linn. F. establecidos en Guanacaste, Costa Rica, con base en el diseño de seis bloques completos al azar con 49 genotipos evaluados. Se analizó el DAP, volumen comercial, número total de ramas, presencia de rama gruesa, calidad del tronco, estado fitosanitario, presencia de bifurcación y altura total a una edad de 4 años. Se encontró una alta correlación genética para el DAP, el volumen comercial y el número total de rama, con valores de $r = 0,89, 0,88$ y $0,91$ respectivamente. Mientras que los valores de heredabilidad media clonal fue de $h^2_{mc} = 0,80, 0,81$ y $0,80$ respectivamente. Si se seleccionan los mejores 10 clones, la ganancia genética esperada en volumen comercial fue de 34,70% con respecto a los testigos. El DAP registró una ganancia genética de 14,05%, que permite acortar el turno de rotación en 2,5 años. El análisis del ensayo en la Cruz registró a los clones NOT con diferencias significativas respecto a las demás procedencias (empresas), mientras que el ensayo en Garza presentó a los clones de las procedencias (empresas) NOT y MAC significativamente diferente con respecto al testigo. Se determinó como de alta productividad a los genotipos 1A, 3A, 3M y 2M en ambos ensayos.

Palabras clave: *Tectona grandis*, Ensayos clonales, Interacción genotipo x ambiente, Costa Rica.

ABSTRACT

It is presented the evaluation of two clonal assays of *Tectona grandis* Linn. F. established in Guanacaste, Costa Rica, based on the design of six randomized complete blocks with 49 genotypes evaluated. It was analyzed: the DBH, commercial volume, total number of branches, presence of thick branch, trunk quality, phytosanitary status, presence of bifurcation and total height at an age of 4 years. A high genetic correlation was found for the DBH, the commercial volume and the total number of branches, with values of $r = 0.89, 0.88$ and 0.91 respectively. While the values of clonal mean heritability were $h^2_{mc} = 0.80, 0.81$ and 0.80 respectively. If the best 10 clones are selected, the expected genetic gain in commercial volume was 34.70% with respect to the controls. The DBH registered a genetic gain of 14.05%, which allows the rotation shift to be shortened by 2.5 years. The analysis of the test in La Cruz registered the NOT clones with significant differences with respect to the other provenances (companies), while the Garza test presented the clones of the provenances (companies) NOT and MAC significantly different with respect to the control. The genotypes 1A, 3A, 3M and 2M were determined to be highly productive in both trials.

Key words: *Tectona grandis*, Clonal assays, Interaction genotype x environment, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético forestal es definido como la identificación y el desarrollo de poblaciones forestales que sean genéticamente superiores y el uso de estas como fuentes semilleras (o material vegetativo) para establecer plantaciones mejoradas (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994).

La búsqueda de material genético superior es un proceso dinámico, se puede eliminar material considerado como inferior o introducir nuevo material genético, esto tomando como principio el factor ambiente y sus variantes (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994); comprobar que poblaciones genéticas se adapten de la mejor forma posible a las condiciones ambientales es uno de los objetivos fundamentales.

Para lograr evaluar el material genético de forma apropiada es recomendable el establecimiento de ensayos clonales, lo cual permitirá demostrar la superioridad real de los genotipos evaluados, por otra parte, esta metodología permite la certificación del material (Camino y Morales, 2013), ya sea para uso interno o comercial, de esta forma el utilizar un número limitado de clones es una gran ventaja para la empresa por motivos de reproducción y almacenamiento del material.

En el mejoramiento genético forestal, la estimación de los componentes de la varianza así como la predicción de los parámetros genéticos son elementos clave en el análisis genético-cuantitativo de características de importancia económica (Mora & Perre, 2007); los avances en mejoramiento permiten la obtención de mayor calidad en el material, esto conlleva a un proceso más rentable y seguro, siempre en busca de la obtención del menor costo posible (Pérez, 2016).

El desarrollo de programas en mejora genética forestal avanza en busca materiales resistentes a diferentes condiciones ambientales. La especificidad del comportamiento de cada genotipo en ambientes contrastantes permite establecer superioridad según la interacción genotipo-ambiente. Además, permite la identificación de aquellos árboles candidatos para una segunda generación que mediante cruces controlados

ofrecen una ganancia genética significativa a través de la selección en generaciones futuras (Cornelius, Mesén, y Corea, 1994).

La adaptación que presenten los materiales genéticos antes las condiciones ambientales es clave para definir clones especialistas para ciertos ambientes o generalistas para todos los ambientes de una región (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013). La tolerancia que pueda presentar esta especie en distintos ambientes permite esclarecer el rumbo que deben tomar los programas de mejoramiento genético ya sea unificándolos o separándolos para de esta obtener el máximo rendimiento de los clones según la estabilidad que presenten en las condiciones evaluadas (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994).

El objetivo de esta investigación es determinar la interacción genotipo x ambiente para dos ensayos clonales de *Tectona grandis* a los 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción de los ensayos

El área de estudio se encuentra en la provincia de Guanacaste y corresponde a dos ensayos clonales establecidos por GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal) y la empresa Novelteak en Guanacaste, Costa Rica (figura 1, cuadro 1).

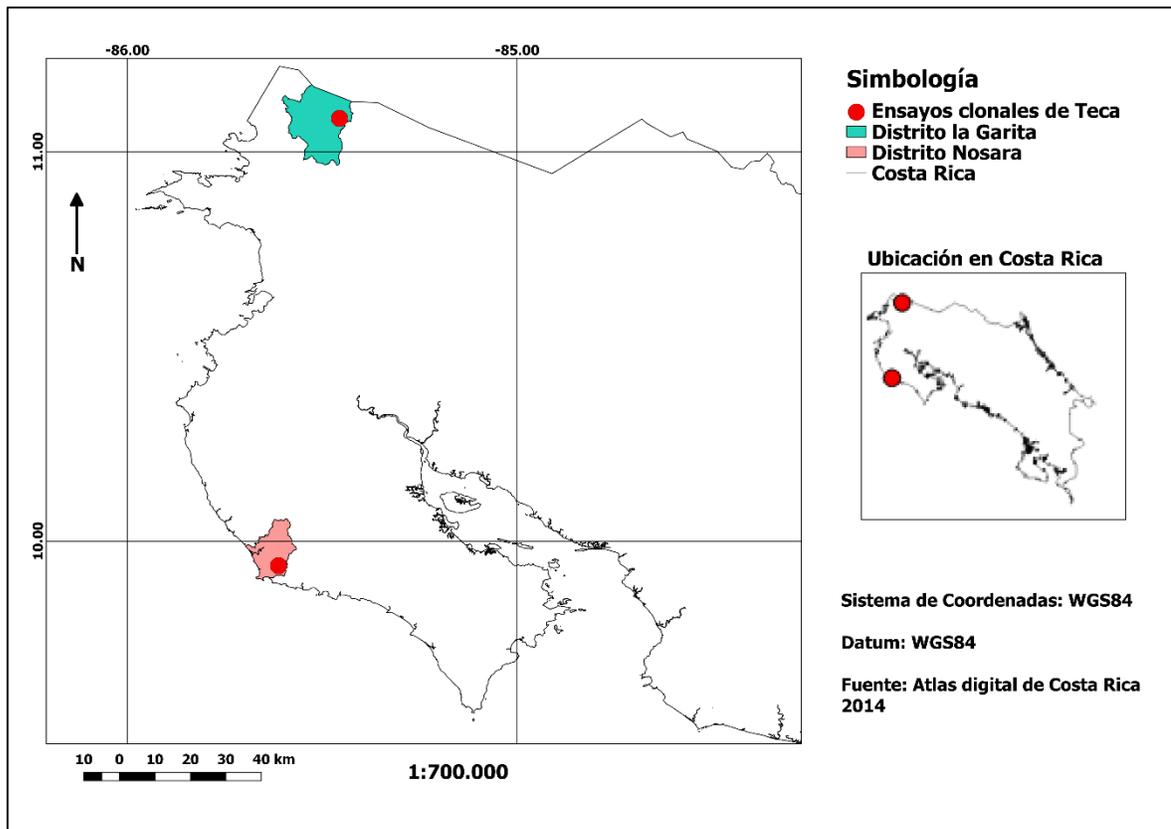


Figura 1. Localización de dos ensayos clonales de *Tectona grandis* de 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.

Cuadro 1. Ubicación espacial de dos ensayos clonales de *Tectona grandis* de 4 años de edad en Guanacaste, Costa Rica.

Localidad	Cantón	Norte	Oeste
La Garita	La Cruz	11°05'09,05"	85°27'20,9"
Garza	Nicoya	9°56'13,2"	85°36'44,1"

Estos ensayos se encuentran en el Pacífico Norte de Costa Rica a 334 y 70 msnm, respectivamente para el ensayo localizado en La Cruz y el localizado en Garza, el primero se encuentra en un bosque húmedo premontano con transición a basal, con una precipitación de 1684 mm y una temperatura de 26,90 °C, para el segundo la zona de vida concuerda con bosque húmedo tropical la precipitación media anual es de 2864 mm y la temperatura media anual es de 28°C (Ortiz, 2014).

Los dos ensayos fueron establecidos en julio del año 2013, donde se evaluaron 47 clones y dos testigos para el ensayo localizado en La Cruz, mientras que el ensayo de Nicoya contaba con 47 clones y un testigo. Al primer ensayo se le atribuye el nombre “La Cruz” y para el segundo el nombre “Garza”. Los testigos evaluados corresponden a la semilla mejorada del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH) y la semilla comercial de la empresa Novelteak. El ensayo La Cruz se encuentra en un lugar levemente inclinado en contraste al ensayo Garza donde las condiciones de terreno son planas.

El ensayo Garza recibió un raleo fitosanitario donde se eliminaron 135 árboles de los 784 que había en total, equivalente al 17,22% del ensayo.

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue el desarrollado por GENFORES (Murillo y Badilla, 2004a), el cual consiste en un diseño de bloques completos al azar, con seis bloques. Cada bloque cuenta con cuatro repeticiones que son distribuidas aleatoriamente en dos parejas independientes y distantes entre sí, además los ensayos se encuentran rodeado por al menos dos hileras de borde (Figura 2).

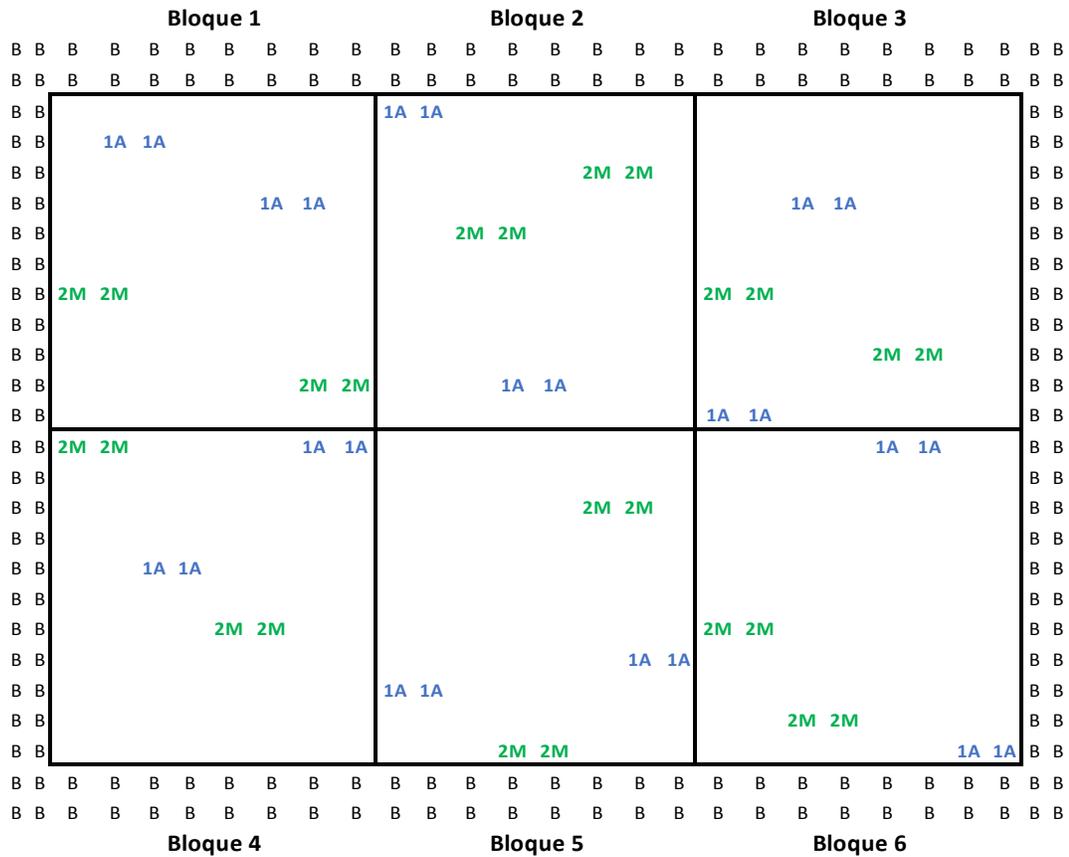


Figura 2. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.

Los árboles se encuentran distribuidos con un distanciamiento de 3,5 x 3,5 metros. El sitio La Cruz fue establecido inicialmente con 1176 árboles y el sitio Garza con 784, esto para un total de 196 árboles evaluados en cada bloque. El sitio Garza fue establecido con 4 bloques y el sitio la Cruz con seis.

La medición se realizó en el mes de agosto del año 2017, se evaluaron ocho caracteres en cada uno. Los caracteres cuantitativos evaluados fueron el DAP, el volumen comercial, la altura total y el número de ramas totales en el fuste.

Los caracteres cualitativos evaluados fueron la presencia de bifurcación, la calidad del fuste, el estado fitosanitario y la presencia de ramas gruesas (cuando el diámetro de la rama es mayor a 1/3 del fuste) (Salas, 2012).

La bifurcación y la presencia de rama gruesa se anotó según su presencia o ausencia (binomial), el valor 1 ausencia del defecto y un valor de 2 que indica presencia. El estado fitosanitario se evaluó en una escala de 1 a 3; valor 1 para aquellos árboles sin problemas fitosanitarios; valor 2 para aquellos que presentaron problemas leves o no significativos para el desarrollo del árbol; y valor 3 para aquellos individuos que presentaron evidencias de problemas fitosanitarios graves que podrían causar un efecto en la sobrevivencia o el desarrollo normal (Arguedas, Rodríguez, & Guevara, 2015).

Respecto a la calidad del tronco, esta se estimó por trozas (2,5 metros de largo), hasta un máximo de cuatro, con valores de 1 a 4, siendo 1 el valor más alto y representa trozas sin ningún defecto, valor 2: para los árboles que presentaran defectos leves, valor 3 para aquellas que presentan limitaciones para el aserrío y valor 4 para las trozas que no pueden ser utilizadas para el aserrío comercial.

Análisis de datos:

Para calcular la calidad de los árboles se utilizó la metodología de Murillo y Badilla (2004b) (Cuadro 2):

Cuadro 2. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).

Cantidad de trozas	Primera troza	Segunda troza	Tercera troza	Cuarta troza
1	1,00			
2	0,60	0,40		
3	0,45	0,33	0,22	
4	0,40	0,30	0,20	0,10

En la ecuación 1 se demuestra la utilización de la fórmula para un árbol con cuatro trozas:

$$Calidad = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (1)$$

Donde:

T1, T2, T3 y T4 son calidades asignadas a cada troza (de 1 a 4)

Troza calidad 1: sin defectos

Troza calidad 2: con defectos leves

Troza calidad 3: con limitaciones para su utilización con aserrío (solo es aprovechable un 50% de la troza en aserrío).

Troza calidad 4: son aquellas trozas con características no aptas para el aserrío.

Para efectos de facilidad en la interpretación de los datos se calcula la calidad porcentual mediante la fórmula 2:

$$\text{Calidad (\%)} = 100 * \left(1 - \frac{\text{calidad}-1}{3}\right) \quad (2)$$

Además, se estimó el volumen comercial hasta un diámetro mínimo de 5 cm, el cual se calculó con el programa Avalúos Forestales (Excel) creado por Murillo y Badilla (2016). Este programa hace uso de un coeficiente de reducción del fuste o conicidad, específico para la especie *T. grandis*, el cual es dependiente del DAP y de los datos ingresados.

Para la determinación de parámetros genéticos en los ensayos se utilizó el software SELEGEN, el cual permite evaluar y diferenciar los factores genéticos y los ambientales, seleccionando de esta forma el mejor material con base en su desempeño, logrando una selección eficiente de los mejores genotipos; además, el procedimiento REML/BLUP (Máxima verosimilitud restringida/Mejor predicción lineal sin sesgo), permite obtener parámetros genéticos y a la vez determinar componentes de la varianza, siendo un método eficaz y confiable para el análisis de ensayos clonales (Pastrana, Espítia, & Murillo, 2012).

Para determinar la interacción genotipo x ambiente se utilizó el software SELEGEN REML/BLUP, con el modelo 3: (bloques Completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, varias localidades) (Resende, 2002), cuyo modelo es: $y = Xr + Zg + Wp + Ti + e$, donde “y” es el vector de datos de la variable dependiente, “r” el vector de efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general,

“g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” el vector de los efectos de la parcela (asumidos como aleatorios), “i” es el vector de los efectos de la interacción genotipo x ambiente (aleatorios), y “e” el vector del error residual (aleatorios).

Se determinó el ranking genético para el volumen comercial en los dos ensayos evaluados, además se obtuvo la ganancia genética en volumen mediante la comparación de los 10 mejores clones respecto al promedio de los ensayos y respecto a los testigos, y también se calculó la ganancia en el DAP.

Respecto a la ganancia genética en el DAP, al multiplicar el porcentaje de ganancia por los años de un turno de rotación base se obtiene el tiempo de disminución en años para el turno de rotación, obteniendo el mismo diámetro pero a una edad más corta.

Además, las posiciones del ranking, de acuerdo a su valor genético, se puede dividir en tres zonas; alto, medio y bajo rendimiento, según esta categorización se puede evidenciar interacciones simples y complejas. Interacción simple para aquellos genotipos que se mueven un rango de categoría e interacción compleja para los que se mueven dos rangos.

Con uso del modelo 102 del Software SELEGEN se determinó la correlación genética entre todos los caracteres analizados.

Posteriormente, se realiza un análisis de los clones que aportó cada empresa miembro de la Cooperativa de Mejoramiento Genético GENFORES, para efecto del análisis se toman los datos como si cada una fuera una procedencia para esta especie. Se utiliza el modelo 24 del Software SELEGEN, corresponde a un diseño de Bloques Completos al Azar, entre varias poblaciones, sin estructura de progenie, en una sola localidad: $y = Xr + Zg + Wp + e$, donde “Y” es el vector de datos de la variable dependiente, “r” es el vector de efectos de repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de efectos genotípicos de poblaciones (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de efectos de parcela y “e” es el vector de errores residuales (aleatorios).

RESULTADOS

El Software SELEGEN REML/BLUP permite la determinación de la certeza o confiabilidad de los parámetros obtenidos mediante el término exactitud de estimación. Valores superiores a un 60% pueden considerarse como altamente confiables (O. Murillo, comunicación personal, 27 de Noviembre, 2017), por lo tanto este estudio omite aquellos caracteres que no alcanzaron este valor de precisión.

El estado fitosanitario y la presencia de bifurcación no cumplen con el requisito de exactitud para ser tomadas en consideración en este análisis (0,32 y 0,37 respectivamente), por otra parte, el sitio Garza no presentó observaciones en el carácter número de ramas gruesas. Los valores más altos de exactitud se obtuvieron en el diámetro, volumen comercial y número de ramas.

Respecto a las heredabilidades individuales el volumen comercial, el DAP y el número de ramas totales presentaron valores buenos de 15,50%, 14,10% y 12,40% respectivamente, misma tendencia se observa para la heredabilidad media del clon, la cual presenta valores altos para estos mismos caracteres (cuadro 3).

La correlación genética entre localidades (Rloc) para: el número de ramas totales, el DAP y el volumen comercial presentó valores altos, lo cual indica relaciones fuertes para los genotipos en las diferentes posiciones del ranking.

La correlación genética en el volumen comercial presenta un valor alto (88%), es decir que el ranking genético logra mantenerse estable para muchos materiales en ambos sitios, no obstante, se observan algunos clones que se desplazan varias posiciones (figura 3).

Cuadro 3. Parámetros genéticos en dos ensayos clonales de *Tectona grandis* a los 4 años de edad en Guanacaste de Costa Rica.

Parámetro	DAP	Número de ramas	Calidad	Volumen comercial	Altura total
Vg	0,78	2,69	8,28	0,00	0,21
Vparc	0,35	1,18	17,88	0,00	0,26
Vint	0,10	0,26	8,82	0,00	0,06
Ve	4,35	17,64	148,34	0,00	1,96
Vf	5,58	21,77	183,32	0,00	2,48
h²g	0,14± 0,03	0,12± 0,03	0,04± 0,02	0,15± 0,03	0,08± 0,02
c²int	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
h²mc	0,80	0,80	0,45	0,81	0,67
Acclon	0,90	0,89	0,67	0,90	0,82
Rgloc	0,89	0,91	0,48	0,88	0,79
SEP	0,39	0,74	2,13	0,01	0,26
CVgi%	7,47	13,03	3,27	15,88	4,35
CVe%	10,09	18,78	8,44	20,11	8,21
Media general	11,86	12,59	87,86	0,10	10,52

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve= Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP= Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

Con relación al volumen comercial, la ganancia genética de los 10 mejores clones del ranking respecto al promedio del ensayo es de 30,50% y de 34,70%, si se compara con el material testigo. El DAP presenta los valores de 13,26% y 14,05% si se compara con el promedio del ensayo y de los testigos, respectivamente.

Para un turno de rotación de 18 años la ganancia genética en el DAP permite acortar 2,5 años; es decir, se obtiene resultados similares en DAP a la edad 15,47 años.

En la figura 3 se encuentran interacciones simples para algunos genotipos de alto rendimiento y una interacción compleja para el clon 30C, además los testigos se mantienen en la categoría de bajo rendimiento para los dos ensayos.

Para las primeras cuatro posiciones en el ranking se mantienen bastante estables con los clones 1A, 3A, 3M, y 2M, para los demás clones su posición en el ranking cambia desfavorablemente ubicándolos fuera del área de los clones de alto rendimiento.

Se identifican genotipos poco estables en el ranking genético como lo son el 3CA, el cual pasa de la posición 7 en el sitio La Cruz hasta la posición 38 en el sitio Garza y el clon 16PA de la posición 9 a la 42 (figura 3).

Además, 5 genotipos que se encuentran entre las últimas diez posiciones del ranking para ambos sitios; TNO, 20PA, 22X, 21PA y 5X, lo cual indica bajos rendimientos en volumen comercial.

La cruz		Garza	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	1A	1	3M
2	3A	2	1A
3	3M	3	3A
4	5M	4	2M
5	2M	5	30C
6	11C	6	4P
7	3CA	7	14C
8	1M	8	25PA
9	16PA	9	22E
10	4P	10	8X
11	15BA	11	26E
12	35E	12	49X
13	4M	13	5M
14	49X	14	6BA
15	33P	15	21E
16	26E	16	33P
17	29P	17	4M
18	14C	18	11BA
19	21E	19	4C
20	11BA	20	15BA
21	25PA	21	1BA
22	30C	22	3
23	2CA	23	11C
24	4CA	24	30X
25	8X	25	35E
26	31E	26	2
27	5CA	27	31E
28	TCA	28	1M
29	6BA	29	5P
30	22E	30	14BA
31	4C	31	29P
32	30X	32	5CA
33	37C	33	26PA
34	5P	34	30
35	53	35	4
36	2	36	2CA
37	23P	37	53
38	1BA	38	3CA
39	30	39	1CA
40	1CA	40	23P
41	26PA	41	37C
42	4	42	16PA
43	TNO	43	20PA
44	3	44	4CA
45	20PA	45	TNO
46	14BA	46	22X
47	22X	47	5X
48	21PA	48	21PA
49	5X	49	---

Figura 3. Ranking genético distribuido en tercios, del volumen comercial en dos ensayos clonales de teca a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica. TCA corresponde al material testigo (semilla mejorada de huerto semillero).

Al comparar el valor genético del volumen comercial en los dos ensayos evaluados se encuentra que el testigo de la semilla comercial que utilizaba la empresa Novelteak (TNO) se localiza muy por debajo del promedio general del ensayo, sin embargo, el testigo (TCA), que corresponde a la semilla mejorada del CACH logra ubicarse muy cerca del promedio del ensayo y cuyos límites superiores le permiten superar este promedio (figura 4).

Mediante el criterio de traslape de los límites de confianza en el volumen comercial se evidencia que los clones 1A, 3A y 3M son estadísticamente diferentes a los dos materiales testigos, lo cual indica alta superioridad genética en relación a los materiales en contraste (figura 4).

El cuadro 4 presenta la matriz de correlaciones genéticas para los caracteres analizados en los ensayos, se evidencia que existe una alta correlación del número de ramas con el DAP y el volumen comercial, es decir que los clones con mayor diámetro y volumen también presentan mayor número de ramas. Muy importante mencionar que los genotipos con mayor valor genético en volumen comercial no coinciden con los genotipos que presentan mejor calidad, es decir para estos dos caracteres no hay una relación fuerte volumen-calidad o una tendencia que permite predecir una variable con base a la otra.

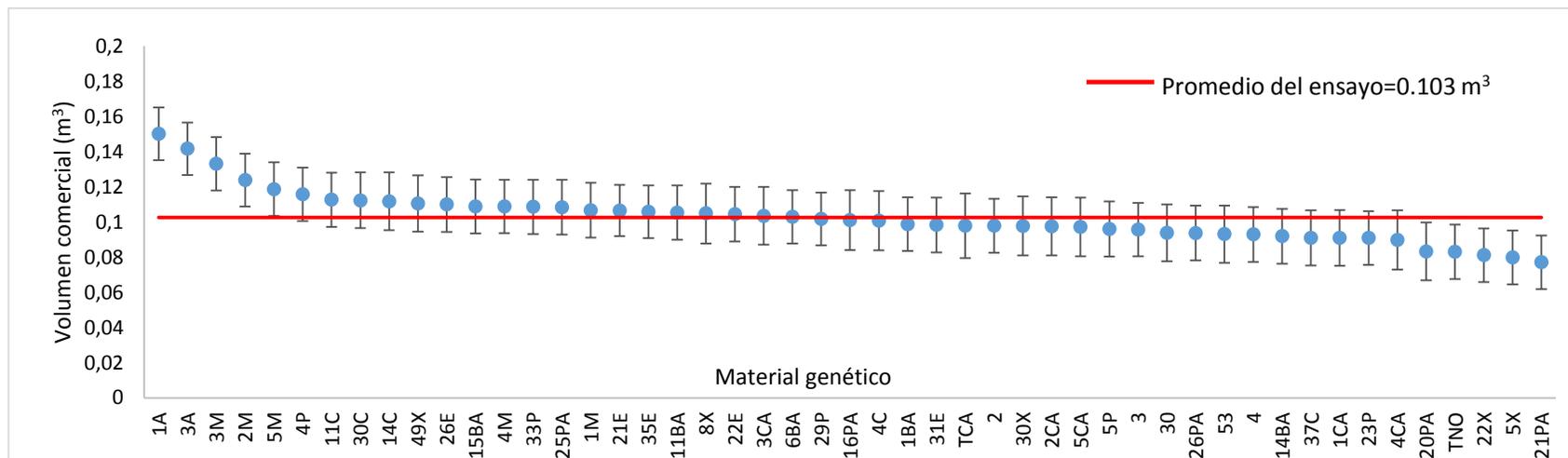


Figura 4. Ranking genético para el volumen comercial (m³) en dos ensayos clonales de *Tectona grandis* a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica.

Cuadro 4. Matriz de correlaciones genéticas para los caracteres analizados en dos ensayos clonales de *Tectona grandis* a los 4 años de edad, en Guanacaste, Costa Rica.

Variable	DAP	N ramas	Calidad	Volcom	Altura total
DAP	1	0.7554	0.287	0.9872	0.8021
N ramas		1	0.5466	0.7808	0.7035
Calidad			1	0.3356	0.4056
Vol com				1	0.8101
Altura total					1

Análisis del material por empresa

Al realizar el análisis de los clones que aportó cada empresa miembro de la Cooperativa GENFORES, se obtuvo excelentes valores de exactitud para el DAP, número de ramas, volumen comercial y altura total (cuadro 5). Así mismo, la heredabilidad media del material por empresa es muy alta para estos caracteres, lo cual indica que existe un alto control genético y diferencias altamente significativas entre las colecciones genéticas de las empresas participantes. Los demás caracteres: presencia de bifurcación, estado fitosanitario y calidad del tronco muestran valores aceptables de exactitud y misma tendencia se observa para la heredabilidad media poblacional.

Cuadro 5. Parámetros genéticos por empresa para un ensayo de *Tectona grandis* a los 4 años de edad en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Parámetro	DAP	Bifurcación	Estado fitosanitario	N ramas	Calidad	Vol total	Altura
Vg	1,25	0,00	0,00	5,97	1,54	0,00	0,26
Vparc	0,19	0,00	0,00	0,30	0,39	0,00	0,02
Ve	4,19	0,08	0,06	17,45	107,00	0,00	1,80
Vf	5,63	0,08	0,06	23,72	108,92	0,00	2,08
H²g	0,22± 0,04	0,01± 0,01	0,02± 0,01	0,25± 0,05	0,01± 0,01	0,29± 0,05	0,12± 0,03
c²parc	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,06	0,01
h²mp	0,95	0,42	0,64	0,97	0,62	0,95	0,93
Acproc	0,97	0,65	0,80	0,98	0,78	0,98	0,97
Media general	10,47	1,08	1,07	11,80	91,67	0,08	9,11

Vg = varianza genotípica entre poblaciones; Vparc = varianza ambiental entre parcelas; Ve = varianza residual; Vf = varianza fenotípica individual; h²g = heredabilidad individual en sentido amplio, es decir, de los efectos genotípicos totales de poblaciones; c²parc = coeficiente de determinación de los efectos de parcela; h²mp = heredabilidad del promedio de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Acproc: exactitud de la selección de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Media = estimado de la media general para el carácter.

El ensayo Garza indica en general parámetros genéticos más bajos en relación al ensayo La Cruz, excepto en los caracteres: estado fitosanitario y calidad, los cuales logran aumentar valores de parámetros genéticos, por otra parte, y de forma general el ensayo la Cruz presenta mejores valores en los parámetros genéticos lo cual es

explicado por la presencia de un mayor número de observaciones en este ensayo (cuadros 5 y 6).

Cuadro 6. Parámetros genéticos por empresa para un ensayo de *Tectona grandis* a los 4 años de edad en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.

Parámetro	DAP	Bifurcación	Estado fitosanitario	N ramas	Calidad	Vol total	Altura
Vg	0,90	0,00	0,00	2,88	27,94	0,00	0,31
Vparc	0,19	0,00	0,00	0,58	6,28	0,00	0,17
Ve	5,90	0,05	0,14	24,44	299,72	0,00	2,99
Vf	6,98	0,05	0,15	27,90	333,93	0,00	3,47
H²g	0,13± 0,05	0,01± 0,01	0,03± 0,02	0,10± 0,04	0,08± 0,04	0,13± 0,05	0,09± 0,04
c²parc	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05
h²mp	0,88	0,35	0,67	0,86	0,84	0,88	0,79
Acproc	0,94	0,60	0,82	0,93	0,91	0,94	0,89
Media general	13,99	1,06	1,18	13,72	82,44	0,14	12,65

Vg = varianza genotípica entre poblaciones; Vparc = varianza ambiental entre parcelas; Ve = varianza residual; Vf = varianza fenotípica individual; h²g = heredabilidad individual en sentido amplio, es decir, de los efectos genotípicos totales de poblaciones; c²parc = coeficiente de determinación de los efectos de parcela; h²mp = heredabilidad del promedio de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Acproc: exactitud de la selección de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Media = estimado de la media general para el carácter.

Las figuras 5 y 6 indican el valor genético del volumen comercial atribuido a cada material por empresa para el sitio la Cruz y Garza, respectivamente, los resultados en las posiciones del ranking presentan gran similitud entre los ensayos, las diferencias se deben a valores significativos entre las empresas para ambos sitios.

En general se observa que el material de la empresa NOT es superior a las otras, seguido por la empresa MAC, el clon 1A, se caracteriza como uno de los mejores para ambos ensayos, cuyo material corresponde a NOT; los clones con la letra M obtienen posiciones altas en el ranking y esto es debido a que esta esta empresa toma el segundo lugar en el ranking.

El testigo TNO corresponde a la semilla comercial que se utilizaba antes de los clones, es importante recalcar que el uso de los clones presenta grandes diferencias significativas respecto a este material, inclusive el testigo TCA, el cual corresponde a semilla mejorada genéticamente por el Centro Agrícola Cantonal de Hojancha presenta bajos rendimientos si se compara al mejor material por empresa presentado en la figura 5.

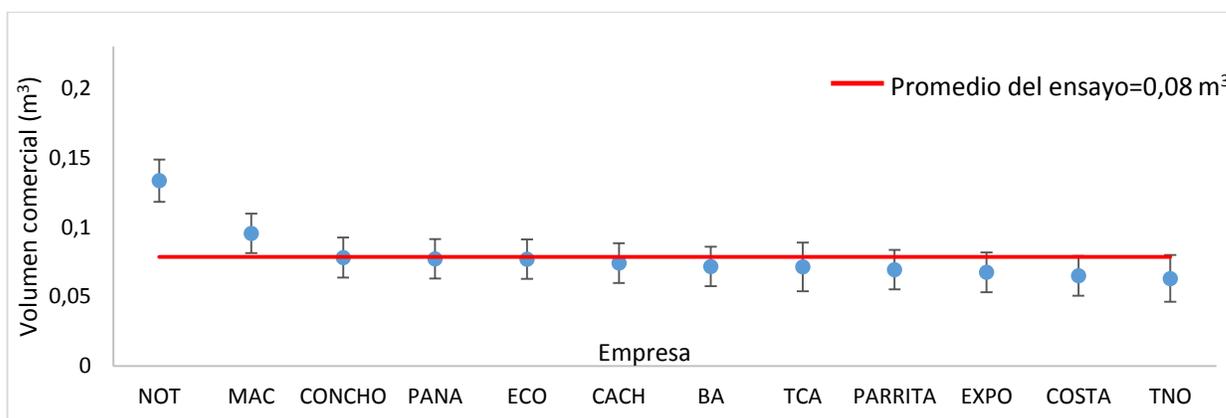


Figura 5. Ranking genético del volumen comercial por empresa en un ensayo clonal de *Tectona grandis* L.f, a los 4 años de edad, en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

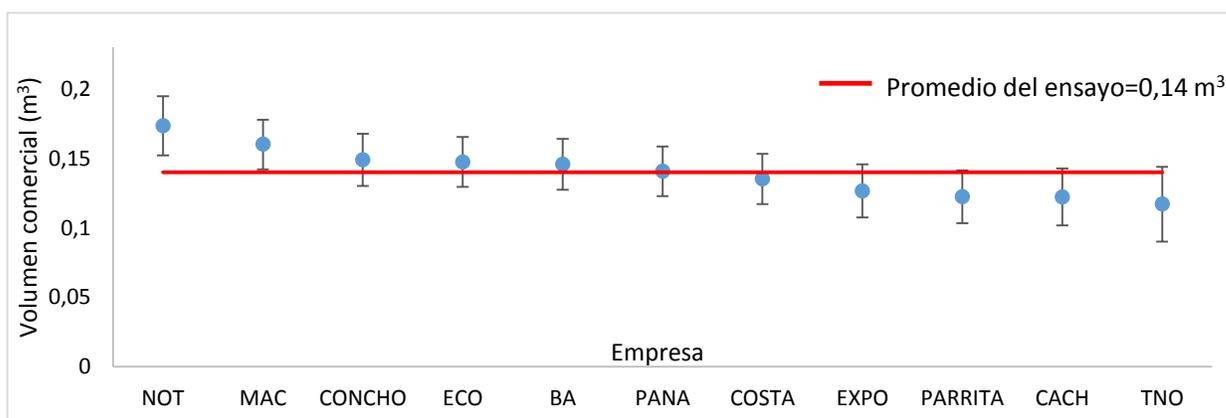


Figura 6. Ranking genético del volumen comercial por empresa en un ensayo clonal de teca (*Tectona grandis* L.f), a los 4 años de edad, en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.

DISCUSIÓN

Correlación genética

La correlación genotípica entre caracteres para ambos sitios es alta para todas las variables analizadas con excepción de la calidad del tronco (cuadro 3), cuyo valor corresponde a un 48% de similitud entre sitios; aún así valores de 88,16%, 89,20%, 91,3% y 78,70% para el volumen comercial, DAP, número de ramas totales y la altura, respectivamente, son indicadores de que a pesar de las diferencias ambientales entre sitios los clones se comportan de una forma muy similar en ambos ensayos.

Badilla y Murillo (2012) mencionan valores de correlación genética entre sitios para tres ensayos clonales de 0,64 y 0,96, para el volumen comercial y la calidad respectivamente, resultados más bajos respecto al presente estudio para el volumen comercial (0,88) pero significativamente más alto para la calidad (0,48), esto indica que en este estudio y respecto a la primera variable el ranking genético es bastante similar, no así para la calidad, registrando diferencias altas para los genotipos según el ambiente en el que se desarrollan.

Se obtuvo valores altos de correlación entre sitios para el número de ramas (0,91), esto indica que a pesar de las diferencias ambientales entre los sitios para los ensayos evaluados estos tienden a presentar un comportamiento muy similar para esta variable; la altura total, por otra parte, presentó el valor de 0,79, de esta forma se afirma que la relación de esta variable para los diferentes genotipos es buena para los dos sitios evaluados.

Es importante recalcar que se observa una tendencia general de reducción en la exactitud de los parámetros en el sitio Garza respecto sitio La Cruz, esto puede estar relacionado a la cantidad de observaciones presentes en ambos sitios, dado que, la tendencia es: a mayor número de unidades experimentales pues mayor será la precisión (Zamudio & Guerra, 2002).

Además, el ensayo Garza recibió un raleo fitosanitario que no va acorde a los lineamientos de manejo establecidos para estos ensayos, dado que se eliminaron

árboles que correspondían a la pareja completa de rametos y por lo tanto la pérdida total de esas unidades de observación para estos materiales específicos. En evaluación de ensayos genéticos siempre se busca la mayor homogeneidad posible tanto para el establecimiento como para el manejo de los sitios a evaluar, de esta forma las diferencias entre ensayos se atribuyen en la mayor proporción posible al factor ambiente (Flores, López, & Valencia, 2014); en este caso diferencias en los resultados podrían ser atribuibles al raleo fitosanitario del ensayo; por otra parte, los dos ensayos recibirán el raleo silvicultural de un 50% a inicios del siguiente año, donde se asume que muchos de los árboles previamente cortados podrían haber pertenecido al porcentaje a árboles a ralear.

Es importante mencionar que el primer raleo, según la metodología de Murillo y Badilla (2004b) se aplica en 1 individuo de cada pareja de clones establecida en el campo, lo cual no sucedió en el raleo fitosanitario del ensayo Garza, eliminando repeticiones que pueden afectar los resultados.

Parámetros genéticos

Heredabilidades individuales de 0,120 y 0,125 para el DAP y el volumen comercial para la teca son obtenidas mediante el análisis de 15 genotipos establecidos en un ensayo clonal en Sabah, localizado al este de Malasia (Goh, Japarudin, Lapammu, Flori, & Monteuis, 2013), similares valores se obtienen para este parámetro en conjunto para ambos sitios de 0,141 y 0,155 respectivamente.

Para los caracteres calidad del tronco y altura total se observan valores bajos de heredabilidad individual y tendencia similar para la heredabilidad media del clon, con valores de 0,45 y 0,67 respectivamente para el último parámetro; Badilla y Murillo (2012) presentan el valor de 0,57 para la heredabilidad media del clon en calidad para tres ensayos clonales de teca localizados en Costa Rica a los 2,4 años de edad, este valor es más bajo que el reportado por este estudio; tal como explican estos mismos autores valores altos en parámetros de heredabilidad pueden estar justificadas por

diferencias de gran magnitud entre los materiales evaluados y además por un error experimental pequeño.

La heredabilidad media del clon presentó valores favorables para el número de ramas totales, DAP y volumen comercial. Pérez (2016) obtuvo valores de heredabilidad media para un ensayo clonal de teca ubicado en el Pacífico Sur de Costa Rica a los 5,4 años de edad, de 84,80% y 85,60% para el volumen comercial y el DAP respectivamente, dígitos cercanos a los obtenidos en este estudio de 80,37% para el DAP y 81,42% para el volumen comercial.

Badilla y Murillo (2012) mencionan valores de heredabilidad media clonal para la calidad de 57% para tres ensayos clonales de teca en Costa Rica, valor relativamente más alto en comparación al obtenido en este estudio para los ensayos (45,54%), mediante esta comparación se podría indicar que las ganancias en este carácter no son tan fuertes como las obtenidas en ramas, volumen y diámetro, aunque se espera una mejoría para la calidad del ensayo una vez aplicado el primer raleo silvicultural, dado que la apariencia de un árbol (fenotipo) es producto tanto de su constitución genética como del ambiente en el cual se desarrolla (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994), por lo tanto al eliminar la más baja expresión genética de cada clon (con base en su apariencia) pues se presenta una tendencia de aumento en sus valores genéticos.

Con base en estos valores se espera grandes beneficios a partir de la selección genética, además, los ensayos se encuentran en una edad de selección muy cercana a la recomendada para realizar la selección genética con base en estos caracteres (Pérez, 2016; Pastrana, Espítia, & Murillo, 2012).

Aunque estos ensayos presentan valores similares o inclusive superiores a otros respecto los informes de Pérez (2016) (para un ensayo de teca localizado en Darién de Panamá) y Muslimin, Sofyan, e Islam (2013); no se recomienda una selección genética con la edad actual que presentan los ensayos, tanto Pérez (2016) como Molina, Gutierrez, e Ipinza, (2001) recomiendan una edad de cinco años como la ideal

para realizar la selección genotípica, por otra parte, es recomendable continuar evaluando los ensayos en periodos post-raleo para determinar si el ranking se mantiene estable y en qué medida cambian los parámetros genéticos.

Ganancia genética

La ganancia genética del volumen comercial obtenida mediante el uso de los mejores diez clones del ranking en comparación a los testigos evaluados es de 34,70%. El diámetro a la altura pecho permite obtener una ganancia genética de 13,26% con el uso de los mejores diez clones en el ranking respecto al promedio del ensayo, si se comparan estos clones respecto a los testigos la ganancia aumenta a 14,05%; estos valores tan cercanos de ganancia al comparar respecto al promedio del ensayo y del testigo muestran que el promedio en valor genético para los testigos es alto y por lo tanto demuestra la calidad del material en comparación.

El testigo de la empresa Novelteak se muestra con valores bajos de ganancia genética en la figura 3, lo cual demuestra los grandes beneficios del uso de clones. Respecto al testigo TCA, corresponde a semilla mejorada del CACH, este material posee un alto nivel de calidad así como lo mencionan Badilla y Murillo (2012) y Leandro, Garzón, y Murillo (2003).

La alta ganancia genética y la idónea selección que se hizo del material evaluado en estos ensayos es respaldado por el estudio de Espitia, Murillo y Castillo (2011), los cuales mencionan que se esperan ganancias genéticas de 5,52% para el DAP y 41,71% para el volumen comercial en relación a la selección de árboles plus en más de 5316 ha comerciales de teca.

En un ensayo clonal de teca al sur de Sumatra, en Indonesia se evaluaron 35 clones a la edad de 5,5 años, en cuyo estudio se obtuvo resultados de 2,80% y 10,65% de ganancia genética para el DAP y el volumen total, respectivamente (Muslimin, Sofyan, & Islam, 2013), en comparación con el presente estudio se demuestra nuevamente los resultados favorables para el programa de mejoramiento genético a partir de la evaluación en estos ensayos.

Goh et al (2013) presenta valores de ganancia genética para la teca de hasta 10,4% y 15,7% para el DAP y el volumen total respectivamente, para 3 de los mejores clones evaluados en un total de 15; valores significativamente más bajos que los obtenidos en este estudio para los ensayos evaluados, además esta información se refuerza con el estudio de Pérez (2016), que obtuvo resultados de 4,6% y 9,3% de ganancia genética para el DAP y el volumen comercial, respectivamente comparando los 10 mejores clones respecto al material testigo.

Valores más altos en ganancia genética, así como una disminución mayor en el turno de cosecha son reflejo de una buena selección de los materiales a evaluar, los cuales permiten obtener resultados satisfactorios, tal como lo menciona Murillo (1992), cuyo autor indica a partir de una amplia y correcta evaluación y selección de árboles plus las ganancias esperadas aumentan considerablemente.

Ranking Genético

Las primeras cuatro posiciones del ranking se mantienen bastante estables con los clones 1A, 3A, 3M, y 2M, para los demás clones su posición en el ranking cambia ya sea de forma positiva o negativa, pero en forma general se puede afirmar que los cambios son poco significativos si se relaciona el coeficiente de correlación genética para el volumen comercial en ambos ensayos, así lo demuestra la figura 3 donde se encontró 5 genotipos que se encuentran entre las últimas diez posiciones del ranking para ambos sitios; TNO, 20PA, 22X, 21PA y 5X, lo cual indica bajos rendimientos para el volumen comercial y además los clones 1A, 3A y 3M se identifican como clones que mantienen alto rendimiento y diferencias significativas respecto a los materiales testigos para ambos ensayos.

Por otra parte, se identifican genotipos poco estables en el ranking genético como lo son el 3CA, el cual pasa de la posición 7 en el sitio La Cruz hasta la posición 38 en el sitio Garza y el clon 16PA de la posición 9 a la 42. Lo cual equivale al 22% de correlación genética que no comparten los ensayos.

Correlación genética entre caracteres

Un alto número de ramas está asociado a un alto valor genético en el DAP y en el volumen comercial, además la calidad del tronco presenta una baja correlación respecto a estos mismos caracteres, lo cual indica que no existe relación que permita deducir un carácter con base en otro.

Lo ideal es que los clones de alto rendimiento expresen también gran similitud respecto al poco número de ramas, excelente calidad, nula bifurcación, nula presencia de rama gruesa, y en general que complementen todas estas variables de forma positiva, pero los resultados para estos ensayos indican que a la hora de realizar la selección genética esta se debe basar en el carácter de mayor interés para el silvicultor o en una combinación que permita capturar un buen componente en alguna variable y al mismo tiempo una proporción adecuada con otras. De esta forma se consiguen materiales con alto rendimiento y al mismo tiempo con buena calidad de fuste lo cual permite aumentar considerablemente las ganancias para el silvicultor.

Material por empresa

Badilla y Murillo (2012) presentan el valor de heredabilidad media para 5 procedencias (empresas) de 94%, con una exactitud de 97% en el volumen comercial, se observan valores similares a los obtenidos en este trabajo para 12 procedencias (empresas) evaluadas en el ensayo La Cruz, por otra parte en el ensayo de Garza baja un poco los valores en los parámetros genéticos. Como se explicó previamente, valores más bajos en el ensayo Garza son fundamentados por la cantidad de repeticiones presentes así como el manejo recibido.

Para ambos ensayos se observa que las mejores empresas coinciden con el análisis de los clones individuales, indicando gran similitud y correlación entre el material por empresa y sus respectivos clones, resultados diferentes son encontrados por Badilla y Murillo (2012) quienes afirman que los resultados por procedencias (empresas) y clones individuales no muestran valores estables debido al comportamiento de clones dentro de una procedencia, algunos se ubican en altas

posiciones del ranking y otros en posiciones bajas, lo cual conlleva a que el promedio general (procedencia) se vea afectado.

Para este informe se determina al material de la empresa NOT como superior a las otras, seguido por la empresa MAC, los clones 1A, 3A se caracterizan como los mejores para ambos ensayos, cuya empresa corresponde a NOT; los clones con la letra M obtienen posiciones altas en el ranking y esto es debido a que esta empresa toma el segundo lugar en el ranking.

El testigo TNO corresponde a la semilla comercial que se utilizaba antes del uso de clones, es evidente y sumamente importante recalcar que el uso de los clones presenta grandes diferencias significativas respecto a este material, inclusive el testigo TCA, el cual corresponde a semilla mejorada genéticamente por el CACH presenta bajos rendimientos si se compara al mejor material en el sitio La Cruz.

CONCLUSIONES

Se encontró una baja interacción genotipo x ambiente y por lo tanto una alta estabilidad para todos los caracteres evaluados con excepción en la calidad del fuste.

La más alta correlación genética entre localidades (Rloc) se presenta en el número de ramas totales, el DAP y el volumen comercial, lo cual indica relaciones fuertes para los genotipos en las diferentes posiciones del ranking.

Los clones 1A, 3A, 3M, y 2M se mantienen en la categoría de alto rendimiento para ambos ensayos y los clones 1A, 3A, y 3M presentan diferencias significativas respecto a los testigos evaluados.

Los testigos se muestran como materiales de bajo rendimiento en comparación al valor genético de los clones en el volumen comercial.

La ganancia genética en el volumen comercial fue de 34,70% al comparar los 10 mejores clones en relación a los testigos.

La ganancia genética en el DAP fue de 14,05%, si se toma 18 años como turno base de rotación de la especie entonces este valor de ganancia permite reducir el turno de cosecha 2,5 años.

La correlación genética entre caracteres indica que los clones con mejor valor genético en volumen comercial poseen también alto número de ramas.

La calidad de fuste y el volumen comercial presentan un bajo valor de correlación genética.

Los mejores materiales por empresa son NOT y MAC, los cuales se ubican arriba del promedio general para ambos ensayos en cuanto al volumen comercial.

REFERENCIAS

- Arguedas, M., Rodríguez, M., & Guevara, M. (2015). Plagas y enfermedades en plantaciones de teca en Centroamérica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Guayaquil, Ecuador.
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2012). *Evaluación del comportamiento de clones de teca (Tectona grandis) en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Camino, R., & Morales, J. P. (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*. Turrialba: CATIE.
- Cornelius, J., Mesén, J., & Corea, E. (1994). *Manual sobre mejoramiento genético forestal: con referencia especial en América Latina*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Resende, d. M. (2002). Software SELEGEN-REML/BLUP. 1. Colombo, Paraná, Brasil: Embrapa Florestas.
- Espitia, M., Murillo, O., & Castillo, C. (2011). Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.f.) en Córdoba (Colombia). *Colombia Forestal*, 14(1), 81-90.
- Flores, C., López, J., & Valencia, S. (2014). *Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y/o progenies*. Comisión Nacional Forestal, Zapopan.
- Goh, D., Japarudin, Y., Lapammu, M., Flori, A., & Monteuuis, O. (2013). Growth differences and genetic parameter estimates of 15 teak (*Tectona grandis* L.f.) genotypes of various ages clonally propagated by microcuttings and planted under humid tropical conditions. *Silvae Genetica*, 62(4-5), 196-206.
- Molina, M., Gutierrez, B., & Ipinza, R. (2001). *Comportamiento de la heredabilidad y los "rankings" individuales en un ensayo de progenies-procedencias de Eucalyptus nitens en función del tiempo e intervenciones de raleo*. Informe de conferencia, Simposio Internacional IUFRO.
- Mora, F., & Perre, S. (2007). Aplicación de técnicas bayesianas en el análisis genético de árboles forestales. *Bosque*, 28(3), 197-200.
- Muñoz, J., Coria, V., García, J., & Balam, M. (2009). Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 34(106), 2-3.
- Murillo, O. (1992). Metodología para diseño y el establecimiento de rodales semilleros. *Tecnología en Marcha*, 11(Número especial), 1-4.

- Murillo, O., & Badilla, Y. (2016). Software para la evaluación de la calidad y valoración de plantaciones forestales. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004a). *Breeding teak in Costa Rica*. IUFRO Meeting, Forest Genetics and Genomics, Charleston, South Carolina, USA.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004b). *Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal*. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago.
- Murillo, O., Wright, J., Monteuis, O., & Montenegro, F. (2013). *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. Turrialba: CATIE.
- Muslimin, I., Sofyan, A., & Islam, S. (2013). Genetic Parameter Estimates in a Clonal Test of Teak (*Tectona grandis* L. F) at 5,5 Years Old in South Sumatera. *Jurnal Pemuliaan Tanaman Hutan*, 7(2), 97-106.
- Ortiz, E. (2014). Atlas digital de Costa Rica. Cartago.
- Pastrana, I., Espítia, M., & Murillo, O. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 3-5.
- Pérez, R. (2016). *Evaluación de ensayos genéticos de teca (Tectona grandis L.f.) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A.* Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica , Cartago.
- Salas, R. (2012). *Evaluación de un ensayo genético de Gmelina arborea en Siquirres, Limón*. Tesis de pregrado, Tecnológico de Costa Rica , Cartago.
- Vega, U. (1990). *Problemario de mejoramiento genético en plantas*. Caracas, Venezuela: Miguel Ángel García e Hijo, s.r.l.
- Zamudio, F., & Guerra, F. (2002). *Reproducción selectiva de especies forestales de rápido crecimiento con énfasis en el género Populus*. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestal .

Capítulo 2.

Evaluación de ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) a diferente densidad de siembra en Siuna, RAAN, Nicaragua.

RESUMEN

Se presenta los resultados de la evaluación de dos ensayos clonales de *Tectona grandis* Linn. F. establecidos a diferente densidad de siembra, 1,5 m x 1,5 m y 3 m x 3 m. Los ensayos evalúan 38 genotipos y un testigo comercial, con base en el diseño genético propuesto por la cooperativa GENFORES. Mediante el Software SELEGEN se obtienen los parámetros genéticos para: el DAP, volumen total, estado fitosanitario, altura total, número de ramas totales, presencia de rama gruesa, calidad del tronco y presencia de bifurcación. Se registró valores altos en exactitud y heredabilidad media clonal para el diámetro y el volumen total en ambos ensayos. La mezcla de clones de Malasia exhibió diferencias significativas respecto a los clones de Costa Rica. La heredabilidad media clonal por empresa fue de $h^2g = 0,76$ y de $0,77$ en el ensayo de alta densidad y en el plantado a 3 m x 3 m. Se evalúan los parámetros genéticos del DAP a los 22 meses de edad y se compara con los datos recolectados por Loría en el año 2016, cuyos resultados corresponden a la evaluación de estos ensayos a los 13 meses de edad. El análisis de interacción genotipo x edad muestra una menor correlación genética entre los ensayos.

Palabras clave: *Tectona grandis*, Ensayos clonales, Interacción genotipo x edad, Nicaragua.

ABSTRACT

It is presented the results of the evaluation of two clonal trials of *Tectona grandis* Linn. F. established at different sowing density, 1.5 m x 1.5 m and 3 m x 3 m. The trials evaluated 38 genotypes and a commercial control, based on the genetic design proposed by the cooperative GENFORES. Through the SELEGEN Software, genetic parameters are obtained for: the DBH, total volume, phytosanitary status, total height, number of total branches, presence of thick branch, trunk quality and presence of bifurcation. High values were recorded in accuracy and clonal mean heritability for diameter and total volume in both trials. The Malaysian clone mixture showed significant differences with respect to the Costa Rican clones. The average clonal heritability per company was $h^2g = 0.76$ and 0.77 in the high density test and in the planted at 3 m x 3 m. The genetic parameters of the DBH are evaluated at 22 months of age and compared with the data collected by Loria in 2016, whose results correspond to the evaluation of these trials at 13 months of age. The genotype-age interaction analysis shows a lower genetic correlation between the trials.

Key words: *Tectona grandis*, Clonal assays, Genotype x age interaction, Nicaragua.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento clonal en teca juega un papel importante para las plantaciones comerciales de esta especie en el mundo, el uso de material genético superior es un factor clave para la rentabilidad en la inversión de reforestación (Camino & Morales, 2013).

La correcta identificación y selección de árboles de gran rendimiento es la base para iniciar programas de mejoramiento genético (Pastrana, 2011); así mismo, la ganancia genética alcanzada depende en gran medida de la calidad y rigurosidad con la cual se realizó la selección (Vallejos, Badilla, Picado, & Murillo, 2010).

Posterior a la selección de árboles fenotípicamente superiores se evalúa mediante ensayos genéticos, lo cual es de vital importancia para la certificación del material, de esta forma se permite seleccionar según su verdadera superioridad genética, la calidad esperada permite obtener mayor productividad con un alto grado de garantía para el inversionista (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013). De esta forma se permite seleccionar los mejores materiales que mantienen una posición alta de sus valores genéticos y así poder continuar con programas de investigación, ya sea evaluando los mejores materiales respecto nuevas introducciones o avanzar a posteriores generaciones de mejoramiento mediante cruces controlados.

La introducción del material genético de teca en Costa Rica aparenta tener una base genética estrecha, por este motivo incluir nuevos genotipos sobresalientes para evaluar en ensayos de procedencias es muy importante para ampliar la base genética actual, de esta forma se previenen posibles problemas de endogamia, además existe la posibilidad de encontrar alguna población que supere en gran medida el material local (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013).

El futuro del desarrollo del mejoramiento genético forestal busca el uso del material que presente el mejor rendimiento en los ensayos genéticos, con el cual se forma una base genética para formar progenitores que mediante cruces controlados permitan la

evaluación de una segunda generación de mejoramiento (Espitia, Murillo, & Castillo, 2011).

En Costa Rica, desde el año 2000 la Cooperativa Internacional de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) ha trabajado en programas de investigación y desarrollo para el mejoramiento genético forestal, mediante la vinculación de empresas GENFORES logró que la clonación alcanzara niveles comerciales, posteriormente se dio la adición de socios fuera de Costa Rica y exportaciones de material genético (Murillo, Badilla, & Rojas, 2010). GENFORES busca la vinculación entre el sector privado y el académico, de esta forma se incentiva el intercambio de material para el desarrollo de programas de mejoramiento genético.

Mediante esta visión GENFORES junto con la empresa MLR Forestal establecieron dos ensayos clonales de teca en Nicaragua a diferente densidad de siembra para evaluar el comportamiento de los parámetros genéticos.

El objetivo del presente estudio es evaluar parámetros genéticos en dos ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) a diferente densidad de siembra, a los 22 meses de edad, en el municipio de Siuna, RAAN, Nicaragua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y descripción de los ensayos

El área de estudio corresponde a dos ensayos clonales establecidos por GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal) y la empresa MLR Forestal en Nicaragua (figura 7).

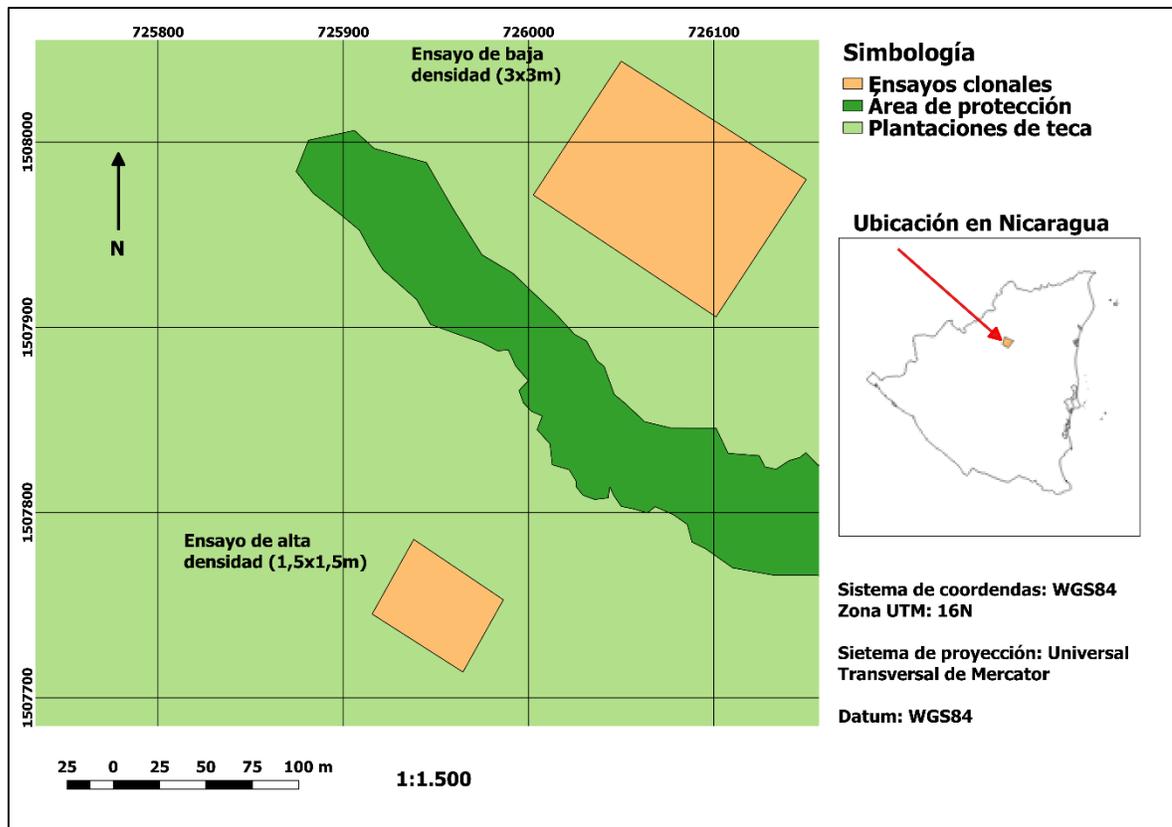


Figura 7. Localización de dos ensayos clonales de *Tectona grandis* de 22 meses de edad establecidos en Nicaragua.

Los ensayos se encuentran en la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN), en la comunidad Aló, 20 Km suroeste de la ciudad de Siuna, el lugar se encuentra en la categoría de bosque húmedo tropical, con una precipitación promedio de 1800 a 2200 mm anuales, con temperaturas mínimas de 23°C entre Diciembre y Febrero y máximas de 32°C entre Marzo hasta Abril y de Agosto hasta Septiembre (Araúz, 2005).

Los ensayos se encuentran en un mismo sitio, separados por 200 metros de distancia; la ubicación geográfica del ensayo de alta densidad (1,5 m x 1,5 m) en formato WGS84 corresponde a 13° 37' 47,23" norte y 84° 54' 41,06" oeste, y para el ensayo de baja densidad (3 m x 3 m) la ubicación geográfica es 13° 37' 54,39" norte y 84 °54' 36,74" oeste. Cuentan con 38 clones y un testigo, este último representado por semilla mejorada proveniente del Centro Agrícola Cantonal de Hojanca, en Costa Rica. Debido a la mortalidad el clon 25PA solo contaba con una observación en el sitio de alta densidad; por lo tanto, se decidió eliminar ese clon en el análisis de este ensayo. Se aplicó 250 g/árbol de cal dolomita y 2 fertilizaciones de 18-46-0 (fosfato diamónico) con una dosis de 200 g/árbol durante el primer año.

Los ensayos evalúan el mismo material genético con excepción del clon 14C que pertenece únicamente al ensayo de alta densidad y el clon 4M el cual se evalúa únicamente en el ensayo de baja densidad.

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue el desarrollado por GENFORES (Murillo y Badilla, 2004a) el cual consiste en un diseño de bloques completos al azar, con seis bloques. Cada bloque cuenta con cuatro repeticiones que son distribuidas aleatoriamente en dos parejas independientes y distantes entre sí, además el ensayo se encuentra rodeado por al menos dos hileras de borde (Figura 8).

Se evaluó 156 árboles por bloque, para un total de 936 árboles en cada ensayo.

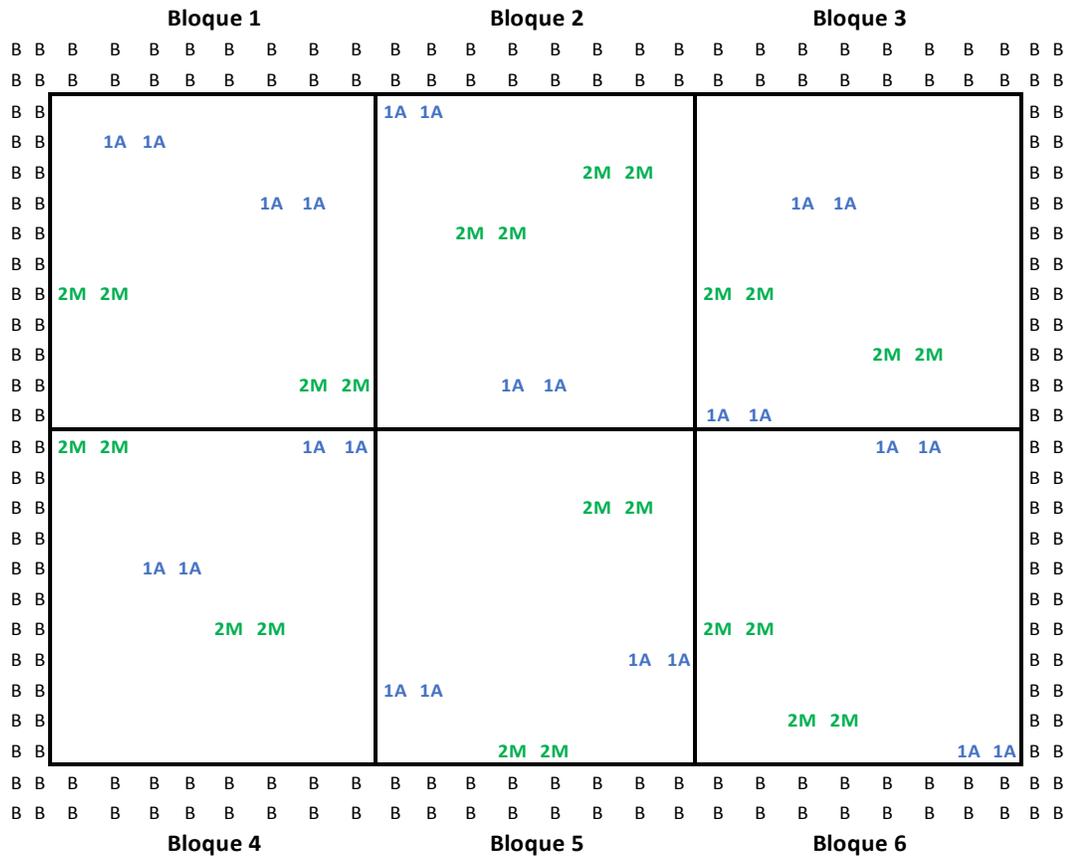


Figura 8. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.

Medición de los ensayos

La medición se realizó en el mes de junio del año 2017, se evaluaron ocho caracteres en cada uno. Los caracteres cuantitativos evaluados fueron el DAP, la altura total, volumen total y el número de ramas totales en el fuste.

Los caracteres cualitativos evaluados fueron la presencia de bifurcación, la calidad del fuste, el estado fitosanitario y la presencia de ramas gruesas (cuando el diámetro de la rama es mayor a 1/3 del fuste) (Salas, 2012).

La bifurcación y la presencia de rama gruesa se anotó según su presencia o ausencia (binomial), el valor 1 ausencia del defecto y un valor de 2 que indica presencia. El estado fitosanitario se evaluó en una escala de 1 a 3; valor 1 para aquellos árboles sin problemas fitosanitarios; valor 2 para aquellos que presentaron problemas leves o no

significativos para el desarrollo del árbol; y valor 3 para aquellos individuos que presentaron evidencias de problemas fitosanitarios graves que podrían causar un efecto en la sobrevivencia o el desarrollo normal (Arguedas, Rodríguez, & Guevara, 2015).

Respecto a la calidad del tronco, esta se estimó por trozas (2,5 metros de largo), hasta un máximo de cuatro, con valores de 1 a 4, siendo 1 el valor más alto y representa trozas sin ningún defecto, valor 2: para los árboles que presentaran defectos leves, valor 3 para aquellas que presentan limitaciones para el aserrío y valor 4 para las trozas que no pueden ser utilizadas para el aserrío comercial.

Análisis de datos:

Para calcular la calidad de los árboles se utilizó la metodología de Murillo y Badilla (2004b) (Cuadro 7):

Cuadro 7. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).

Cantidad de trozas	Primera troza	Segunda troza	Tercera troza	Cuarta troza
1	1,00			
2	0,60	0,40		
3	0,45	0,33	0,22	
4	0,40	0,30	0,20	0,10

En la ecuación 1 se demuestra la utilización de la fórmula para un árbol con cuatro trozas:

$$Calidad = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (1)$$

Donde:

T1, T2, T3 y T4 son calidades asignadas a cada troza (de 1 a 4)

Troza calidad 1: sin defectos

Troza calidad 2: con defectos leves

Troza calidad 3: con limitaciones para su utilización con aserrío (solo es aprovechable un 50% de la troza en aserrío).

Troza calidad 4: son aquellas trozas con características no aptas para el aserrío.

Para efectos de facilidad en la interpretación de los datos se calcula la calidad porcentual mediante la fórmula 2:

$$Calidad (\%) = 100 * (1 - \frac{calidad-1}{3}) \quad (2)$$

Según Darwin (2013) y Tamarit y otros (2013) la teca presenta factores de forma de 0,55 y 0,43; respectivamente, para efectos del cálculo del volumen total se utilizó un factor de forma de 0,5, con la siguiente fórmula:

$$V_{total} = 0,7854 * \left(\frac{dap}{100}\right)^2 * h_{total} * 0,5 \quad (3)$$

Para la determinación de parámetros genéticos en los ensayos se utilizó el software SELEGEN, el cual permite evaluar y diferenciar los factores genéticos y los ambientales, seleccionando de esta forma el mejor material con base en su desempeño, logrando una selección eficiente de los mejores genotipos; además, el procedimiento REML/BLUP (Máxima verosimilitud restringida/Mejor predicción lineal sin sesgo), permite obtener los parámetros genéticos y a la vez determinar componentes de la varianza, siendo un método eficaz y confiable para el análisis de ensayos clonales (Pastrana, Espítia, & Murillo, 2012).

Para la determinación de parámetros genéticos se utilizó el modelo 2: (bloques Completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela), el modelo utilizado fue $Y = Xr + Za + Wp + Ti + e$ (Resende, 2002). Donde Y es el vector de los datos y además un factor común entre las familias evaluadas, r corresponde a los efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, α corresponde a los efectos genéticos aditivos individuales (asumidos como aleatorios), p corresponde a los efectos de la parcela (asumidos como aleatorios), i corresponde a los efectos de la interacción genotipo-ambiente (aleatorios) y e corresponde a los efectos del error en el experimento (aleatorios) (Murillo, Badilla, Villalobos, y Rojas, 2013).

Se determinó la ganancia en volumen total obtenida mediante la comparación de los 10 mejores clones respecto al ensayo en su totalidad y respecto al testigo evaluado; además, también se determinó la ganancia genética en el DAP.

Respecto a la ganancia genética en el DAP, al multiplicar el porcentaje de ganancia por los años de un turno de rotación base se obtiene el tiempo de disminución en años para el turno de rotación, obteniendo el mismo diámetro pero a una edad más corta.

El análisis en las posiciones del ranking, de acuerdo a su valor genético, se puede dividir en tres zonas; alto, medio y bajo rendimiento, según esta categorización se puede evidenciar interacciones simples y complejas. Interacción simple para aquellos genotipos que se mueven un rango de categoría e interacción compleja para los que se mueven dos rangos.

Para determinar la interacción genotipo-densidad se utilizó el modelo 3: (bloques Completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, varias localidades), cuyo modelo es: $y = Xr + Zg + Wp + Ti + e$, donde “y” es el vector de datos de la variable dependiente, “r” el vector de efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” el vector de los efectos de la parcela (asumidos como aleatorios), “i” es el vector de los efectos de la interacción genotipo x ambiente (aleatorios), y “e” el vector del error residual (aleatorios).

Dado que los valores en los parámetros genéticos pueden ser influenciados por la superioridad genética de la mezcla de clones DR, se decidió realizar un análisis para cada ensayo excluyendo este material y así presentar los resultados del Software SELEGEN con base en los demás materiales genéticos (colección GENFORES).

Posteriormente se realiza un análisis de los clones que aportó cada empresa miembro de la Cooperativa GENFORES, en este caso se analizan los datos como si cada una fuera una procedencia para esta especie. Se utiliza el modelo 24 del Software SELEGEN, el cual corresponde a un diseño de Bloques Completos al Azar, entre varias poblaciones, sin estructura de progenie, en una sola localidad: $y = Xr + Zg + Wp$

+ e, donde “Y” es el vector de datos de la variable dependiente, “r” es el vector de efectos de repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de efectos genotípicos de poblaciones (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de efectos de parcela y “e” es el vector de errores residuales (aleatorios).

Se realiza una comparación entre los datos obtenidos a los 13 meses de edad respecto a los datos a los 22 meses de edad para el DAP.

RESULTADOS

El Software SELEGEN REML/BLUP permite la determinación de la certeza o confiabilidad de los parámetros obtenidos mediante el término exactitud de estimación. Valores superiores a un 60% pueden considerarse como altamente confiables (O. Murillo, comunicación personal, 27 de Noviembre, 2017), por lo tanto este estudio omite aquellos caracteres que no alcanzaron este valor de precisión.

El número de ramas, presencia de rama gruesa y calidad no se analizaron en el ensayo de alta densidad debido al bajo valor de exactitud obtenido (0,31, 0,38 y 0,40 respectivamente). En el ensayo de alta densidad no se analizó la bifurcación debido al bajo valor de exactitud (0,28) y tampoco la calidad del fuste debido que no se contaba con este dato.

Ensayo de alta densidad (1,5 m x 1,5 m)

El DAP y el volumen total presentan valores de exactitud muy altos que indican confiabilidad para estos dos caracteres, la presencia de bifurcación obtiene mejores valores de exactitud para el ensayo de alta densidad, debido a un aumento de observaciones referidas al efecto de estrés provocado por la densidad de siembra.

Se observa valores de heredabilidad individual buenos para el diámetro (0,11) y el volumen total (0,12); la heredabilidad media del clon presenta valores muy altos para estos mismos caracteres, lo cual es un indicador de obtención de beneficios a partir de la selección genética en el ensayo evaluado (cuadro 8).

El estado fitosanitario, la presencia de bifurcación y la altura presentan un alto grado de variación experimental, tal como lo demuestra el valor de coeficiente de variación relativa, es decir que el factor ambiente influye fuertemente en el estimado de estos caracteres.

Cuadro 8. Parámetros genéticos para un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Parámetros	DAP	Bifurcación	Estado fitosanitario	Voltotal	Altura
Vg	0,12	0,01	0,00	0,00	0,19
Vparc	0,01	0,04	0,03	0,00	0,39
Ve	0,97	0,17	0,07	0,00	2,30
Vf	1,10	0,22	0,10	0,00	2,89
h²g	0,11±	0,04±	0,03±	0,12±	0,06±
	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02
h²mc	0,96	0,56	0,36	0,97	0,72
Exactitud	0,98	0,75	0,60	0,98	0,85
CVgi%	5,37	6,49	4,89	21,47	8,76
CVe%	2,61	13,95	16,00	9,27	13,24
CVr	2,06	0,47	0,31	2,32	0,66
SEP	0,07	0,06	0,04	0,00	0,23
Media general	6,48	1,44	1,11	0,009	4,96

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcela; Ve = Varianza residual o no explicada por el modelo; Vf = Varianza fenotípica total = Vg+Vparc+Ve; h²g= Heredabilidad individual en sentido amplio; h²mc = Heredabilidad media del clon; Exactitud = Exactitud en la estimación de los parámetros; CVgi% = Coeficiente de variación genética; CVe% = Coeficiente de variación experimental; CVr = Coeficiente de variación relativa; SEP = Desviación estándar del valor genotípico de cada clon.

Haciendo uso del criterio de traslape de los límites de confianza se evidencia en la figura 9 que únicamente la mezcla de clones “DR” es significativamente diferente a todo el material evaluado en el ensayo, lo cual demuestra que este material expresa su potencial genético a edades tempranas.

Ganancia genética

Hay un material evidentemente superior a los otros, la mezcla de clones “DR”, cuya ganancia genética para el volumen total es de 85,00% respecto al material testigo y de 77,48% respecto al promedio del ensayo.

Si se analizan los mejores diez clones en el ranking genético en contraste al material testigo se logra obtener una ganancia genética de 38,38% y de 34,98% para el promedio del ensayo, en relación al volumen total.

La ganancia genética obtenida en el DAP para los 10 mejores clones en el ranking es de 8,44% y de 8,29% respecto al promedio del ensayo y al testigo evaluado. La diferencia en ganancia genética es un poco menor si se compara al testigo, esto debido a que el testigo ocupó la octava posición en el ranking para el DAP. Tendencia diferente si se analiza el volumen total donde el testigo tomó la posición 24 para en el ranking (figura 9).

Para un turno de rotación de 18 años la ganancia genética permite acortar 1,49 años; es decir, se obtienen los mismos resultados a la edad 16,51 años.

Ensayo de baja densidad (3 m x 3 m)

En el cuadro 9, se observan valores altos de heredabilidad individual, 0,14 para el DAP y 0,16 para el volumen total, tendencia similar se repite para la heredabilidad media del clon con 93% y 90% para el DAP y volumen, respectivamente. La altura y el número de ramas también expresan valores altos para este parámetro, siendo todos indicadores de la posibilidad de realizar una selección que permitan grandes beneficios para estos caracteres.

El estado fitosanitario, la presencia de rama gruesa, la altura y el número de ramas presentan altos valores de variación experimental, así lo comprueba el coeficiente de valor relativo, el DAP y volumen total, por otra parte, presentan mayor valor de coeficiente de variación genética lo cual es ventajoso en un programa de mejoramiento genético.

Mediante uso del criterio de traslape de los límites de confianza se evidencia en la figura 10 que la mezcla de clones “DR” es significativamente diferente a todo el material evaluado en el ensayo. La segunda posición en el Ranking la toma el clon “35E” el cual es significativamente diferente al material testigo y a los 7 últimos clones en el

ranking. Y los clones “31E” y “30C” son significativamente diferentes a los últimos tres clones en el ranking.

Cuadro 9. Parámetros genéticos para un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Parámetros	DAP	Estado fitosanitario	N ramas	Rama gruesa	Voltotal	Altura
Vg	0,26	0,00	1,13	0,00	0,00	0,12
Vparc	0,03	0,01	0,64	0,00	0,00	0,12
Ve	1,51	0,09	13,32	0,06	0,00	1,14
Vf	1,80	0,10	15,09	0,06	0,00	1,38
h²g	0,14± 0,04	0,01± 0,01	0,07± 0,03	0,01± 0,01	0,16± 0,04	0,08± 0,03
h²mc	0,93	0,38	0,83	0,51	0,90	0,79
Exactitud	0,96	0,62	0,91	0,72	0,95	0,89
CVgi%	6,44	3,58	13,02	2,40	16,77	5,41
CVe%	4,32	11,15	14,63	5,74	13,32	6,90
CVr	1,49	0,32	0,89	0,42	1,26	0,78
SEP	0,14	0,03	0,44	0,02	0,00	0,16
Media general	7,94	1,07	8,15	1,06	0,017	6,34

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcela; Ve = Varianza residual o no explicada por el modelo; Vf = Varianza fenotípica total = Vg+Vparc+Ve; h²g= Heredabilidad individual en sentido amplio; h²mc = Heredabilidad media del clon; Exactitud = Exactitud en la estimación de los parámetros; CVgi% = Coeficiente de variación genética; CVe% = Coeficiente de variación experimental; CVr = Coeficiente de variación relativa; SEP = Desviación estándar del valor genotípico de cada clon.

Ganancia genética

La ganancia genética obtenida para el volumen total entre la mezcla de clones DR contra el testigo es de 60,39% y la mezcla contra el promedio del ensayo es de 67,33%. Respecto al volumen total, si se analizan los mejores diez clones en el ranking genético en contraste al material testigo se logra obtener una ganancia genética de 31,93% y de 28,64% para el promedio del ensayo.

La ganancia genética obtenida en el DAP para los 10 mejores clones en el ranking es de 10,61% y de 10,88% respecto al promedio del ensayo y al testigo evaluado. El testigo tomó la posición 32 en el ranking del volumen total (figura 10).

La ganancia genética en el DAP respecto al material testigo permite predecir la disminución de 1,96 años en el turno de cosecha, esto para un turno base de 18 años.

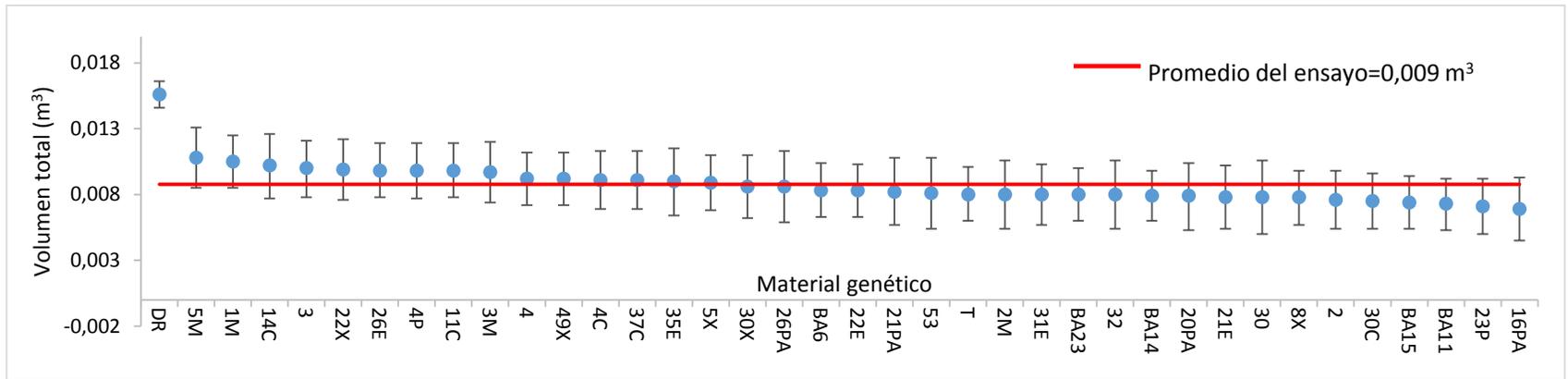


Figura 9. Ranking genético del volumen total (m³) para un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

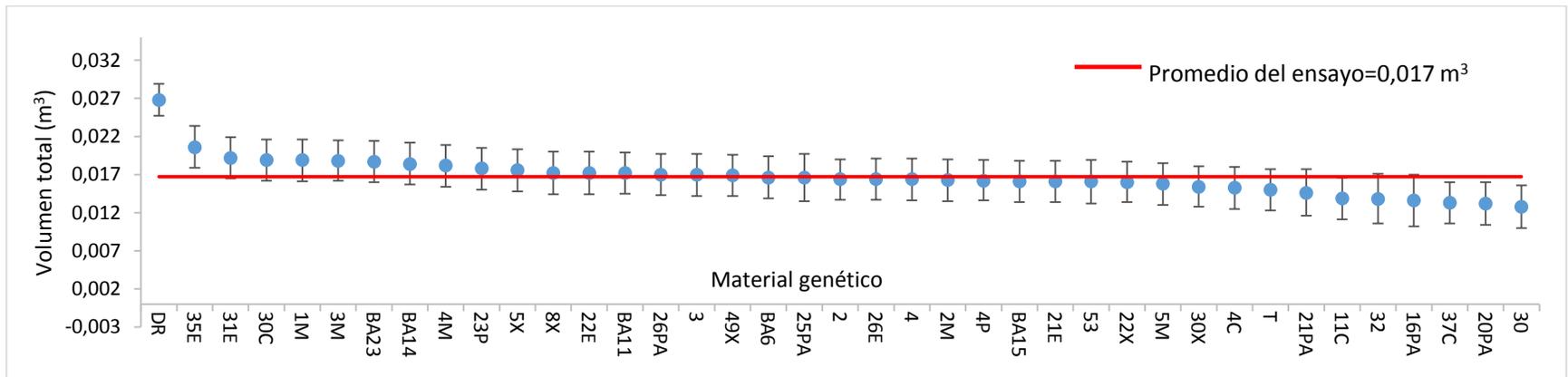


Figura 10. Ranking genético del volumen total (m³) para un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 3 m x 3 m, a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Análisis integrado de ensayos

Mediante el uso del modelo 3 del software SELEGEN REML/BLUP se analizaron los dos ensayos de teca en conjunto para evidenciar la correlación genética que presentan, el cuadro 10 muestra los resultados para los caracteres cuya exactitud en la predicción de sus valores genéticos fue mayor a 0,6.

Se obtuvo valores de correlación genética muy semejantes entre el DAP, volumen total y altura; estos valores indican que existe poca variación en el rendimiento de algunos genotipos si se considera que son ensayos similares, cuya diferencia se atribuye al factor densidad. Algunos materiales se mantienen estables en el ranking y otros tienden a desplazarse a otras categorías (figura 11).

El estado fitosanitario también obtiene una correlación genética baja; es decir, que los genotipos que presentan algún problema fitosanitario no tienden a ser los mismos entre ensayos.

El estado fitosanitario y el número de ramas obtienen una proporción alta de variación experimental, resultado predecible si se analiza cada ensayo por separado como lo demuestran los cuadros 8 y 9 estos ensayos también obtuvieron resultados altos para este parámetro en estos caracteres.

Al comparar la evaluación individual de cada ensayo respecto a la evaluación en conjunto se observa una reducción en los estimados genéticos para el DAP y el volumen total; el valor de exactitud en la predicción de los parámetros así como la heredabilidad media e individual muestran un descenso considerable.

Los únicos caracteres que no presentaron un descenso en el estimado de los parámetros genéticos fueron: el estado fitosanitario cuya heredabilidad media clonal fue mayor en los ensayos por separado y el número de ramas cuyos resultados son mucho mayores en el ensayo de baja densidad.

Cuadro 10. Parámetros genéticos para dos ensayos de *Tectona grandis* plantados a diferente densidad a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Parámetros	DAP	Estado fitosanitario	N ramas	voltotal	Altura
Vg	0,11	0,00	0,28	0,00	0,10
Vparc	0,02	0,02	1,01	0,00	0,20
Vint	0,08	0,00	0,44	0,00	0,05
Ve	1,24	0,08	9,79	0,00	1,75
Vf	1,45	0,10	11,51	0,00	2,10
h²g	0,07±0,02	0,01±0,01	0,02±0,01	0,08±0,02	0,05±0,01
c²int	0,05	0,01	0,04	0,05	0,02
h²mc	0,70	0,26	0,46	0,73	0,69
Exactitud	0,84	0,51	0,68	0,85	0,83
rgloc	0,58	0,38	0,39	0,62	0,68
SEP	0,18	0,02	0,39	0,00	0,18
CVgi%	4,54	2,58	8,59	14,51	5,63
CVe%	2,87	12,53	17,52	10,44	8,45
Promedio	7,20	1,09	6,19	0,013	5,65

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve= Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP= Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

La figura 11 evidencia que no existen interacciones complejas para los genotipos evaluados en ambos ensayos; la mezcla de clones “DR” se mantiene en la primera posición del ranking demostrando la superioridad y estabilidad del material en diferentes densidades de siembra. El clon “35E” se encuentra en la categoría de clones de alto rendimiento pero solo para el ensayo de baja densidad pues baja una categoría en el ensayo de alta densidad.

En la segunda categoría, para materiales de medio rendimiento se logra ver que algunos clones se mantienen estables (1M, 3, 3M, 49X, 5X, 25PA, y 26PA) en ambos ensayos.

En el ensayo de alta densidad el clon 5M se localiza en la segunda posición del ranking, pero no logra entrar en la categoría de alto rendimiento debido a la alta superioridad del material DR, por otra parte, el clon 5M baja considerablemente en el

ranking al compararlo con el otro ensayo de baja densidad, ahora presentado como un clon de bajo rendimiento; es decir, que la densidad de siembra influye en gran medida en algunos genotipos, así lo demuestra el poco valor de correlación genética (62%) para los ensayos en este carácter.

Alta densidad		Baja densidad	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	DR	1	DR
2	5M	2	35E
3	1M	3	31E
4	14C	4	30C
5	3	5	1M
6	22X	6	3M
7	26E	7	BA23
8	4P	8	BA14
9	11C	9	4M
10	3M	10	23P
11	4	11	5X
12	49X	12	8X
13	4C	13	22E
14	37C	14	BA11
15	35E	15	26PA
16	5X	16	3
17	30X	17	49X
18	26PA	18	BA6
19	BA6	19	25PA
20	22E	20	2
21	21PA	21	26E
22	53	22	4
23	T	23	2M
24	2M	24	4P
25	31E	25	BA15
26	BA23	26	21E
27	32	27	53
28	BA14	28	22X
29	20PA	29	5M
30	21E	30	30X
31	30	31	4C
32	8X	32	T
33	2	33	21PA
34	30C	34	11C
35	BA15	35	32
36	BA11	36	16PA
37	23P	37	37C
38	16PA	38	20PA
		39	30

Figura 11. Ranking genético para el volumen total (m³) a los 22 meses de edad en dos ensayos clonales de teca, a diferente densidad de siembra, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Análisis de los ensayos con los clones de la colección GENFORES

El material DR no corresponde a la colección de clones GENFORES, además es evidente que la mezcla de clones DR es superior estadísticamente a todos los materiales evaluados. Los altos valores en los parámetros genéticos pueden ser influenciados por la superioridad genética de este material, por este motivo se decidió realizar un análisis para cada ensayo con la exclusión del material DR.

Se presenta en el cuadro 11 los resultados del análisis del ensayo de alta densidad, respecto a los valores de exactitud, únicamente dos caracteres de un total de ocho lograron cumplir este requisito, por otra parte se observa un descenso drástico en todos los parámetros genéticos para el DAP y el volumen total.

Cuadro 11. Parámetros genéticos para un ensayo de *Tectona grandis* plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

Parámetros	DAP	Voltotal
Vg	0,03	0,00
Vparc	0,01	0,00
Ve	0,97	0,00
Vf	1,00	0,00
h²g	0,03±0,02	0,05±0,03
h²mc	0,39	0,52
Exactitud	0,62	0,72
CVgi%	2,52	11,91
CVe%	7,72	28,07
CVr	0,33	0,42
SEP	0,13	0,00
Media general	6,44	0,009

Vg = Componente de varianza genético total; Vparc = Varianza ambiental entre parcela; Ve = Varianza residual o no explicada por el modelo; Vf = Varianza fenotípica total = Vg+Vparc+Ve; h²g= Heredabilidad individual en sentido amplio; h²mc= Heredabilidad media del clon; Exactitud= Exactitud en la estimación de los parámetros; CVgi%= Coeficiente de variación genética; CVe%= Coeficiente de variación experimental; CVr= Coeficiente de variación relativa; SEP= Desviación estándar del valor genotípico de cada clon.

El cuadro 12 presenta los resultados del Software SELEGEN para el ensayo de baja densidad, se muestra en general valores más altos respecto al ensayo de alta densidad, tanto el DAP como el volumen total alcanzan mejores valores en los

parámetros genéticos, además la variación experimental es más alta en el ensayo de alta densidad.

A pesar de la disminución en los parámetros genéticos se observa que tanto el DAP como el volumen total muestran buenos valores de exactitud así como de heredabilidad media clonal, situación similar sucede con los demás caracteres a excepción de la altura total la cual muestra un leve descenso debido a la estimación de trozas para calcular esta variable.

Cuadro 12. Parámetros genéticos para un ensayo de *Tectona grandis* plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

Parámetros	DAP	N ramas	Rama gruesa	Voltotal	Altura
Vg	0,15	1,19	0,05	0,00	0,07
Vparc	0,03	0,41	0,02	0,00	0,10
Ve	1,52	14,01	0,54	0,00	1,23
Vf	1,70	15,61	0,60	0,00	1,40
h²g	0,09± 0,03	0,08± 0,03	0,09± 0,13	0,08± 0,03	0,05± 0,02
h²mc	0,73	0,69	0,67	0,70	0,56
Exactitud	0,85	0,83	0,82	0,84	0,75
CVgi%	4,87	13,36	15,54	11,50	4,26
CVe%	7,34	21,95	26,51	18,41	9,33
CVr	0,66	0,61	0,59	0,62	0,46
SEP	0,20	0,61	0,13	0,00	0,18
Média general	7,89	8,17	1,46	0,02	6,31

Vg = Componente de varianza genético total; Vparc = Varianza ambiental entre parcela; Ve = Varianza residual o no explicada por el modelo; Vf = Varianza fenotípica total = Vg+Vparc+Ve; h²g= Heredabilidad individual en sentido amplio; h²mc= Heredabilidad media del clon; Exactitud= Exactitud en la estimación de los parámetros; CVgi%= Coeficiente de variación genética; CVe%= Coeficiente de variación experimental; CVr= Coeficiente de variación relativa; SEP= Desviación estándar del valor genotípico de cada clon.

Los parámetros genéticos para los ensayos en conjunto muestran un descenso muy fuerte en los mismos, el DAP y el volumen total no logran valores de exactitud mayores a 0,6 pero se agregan al cuadro 13 debido a la importancia de estos caracteres.

Cuadro 13. Parámetros genéticos obtenidos para dos ensayos de *Tectona grandis* plantados a diferente densidad a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

Parámetros	DAP	N ramas	Voltotal	Altura
Vg	0,01	0,29	0,00	0,03
Vparc	0,01	0,50	0,00	0,25
Vint	0,08	0,50	0,00	0,04
Ve	1,29	11,28	0,00	1,71
Vf	1,40	12,57	0,00	2,02
h ² g	0,01±0,01	0,02± 0,01	0,01±0,01	0,01±0,01
c ² int	0,06	0,04	0,06	0,02
h ² mc	0,16	0,37	0,13	0,27
Acclon	0,40	0,61	0,36	0,52
rgloc	0,13	0,37	0,11	0,39
SEP	0,10	0,43	0,00	0,14
CVgi%	1,59	8,70	4,18	2,90
CVe%	7,28	26,80	21,54	13,73
Media general	7,16	6,20	0,01	5,60

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve= Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP= Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

Se procedió a realizar un análisis por tercios de rendimiento en el valor genético del volumen total (figura 12) y así determinar la similitud en las posiciones del ranking para los ensayos según la categorización de rendimiento (alto-medio-bajo).

Alta densidad		Baja densidad	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	5M	1	35E
2	1M	2	31E
3	14C	3	30C
4	3	4	1M
5	11C	5	3M
6	26E	6	BA23
7	4P	7	BA14
8	22X	8	4M
9	3M	9	23P
10	49X	10	5X
11	4	11	8X
12	4C	12	BA11
13	37C	13	22E
14	35E	14	26PA
15	5X	15	3
16	26PA	16	49X
17	30X	17	BA6
18	BA6	18	25PA
19	22E	19	2
20	21PA	20	26E
21	53	21	4
22	2M	22	2M
23	32	23	4P
24	BA23	24	53
25	31E	25	21E
26	T	26	BA15
27	20PA	27	22X
28	30	28	5M
29	BA14	29	30X
30	21E	30	4C
31	8X	31	T
32	2	32	21PA
33	30C	33	32
34	BA15	34	11C
35	BA11	35	16PA
36	23P	36	37C
37	16PA	37	20PA
		38	30

Figura 12. Ranking genético para el volumen total (m³) en dos ensayos clonales GENFORES de teca, a diferente densidad de siembra con 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Se presentan 8 clones en la categoría de alto rendimiento para el ensayo de alta densidad, efecto contrario en el ensayo de baja densidad en donde se observa que esta categoría es mucho más selectiva, el clon 35E se mantiene en la primera posición del ranking y el clon 31E logra posicionarse en el segundo lugar del ranking presentado como un clon de alto rendimiento.

Gran cantidad de clones presentan interacciones complejas en los ensayos, por lo tanto, el desempeño de los materiales genéticos en el volumen total difiere según el ensayo que se evalúe. La diferencia en densidad para los ensayos es un factor que altera en gran medida la productividad los clones evaluados, representada por el valor de correlación genética, el cual fue de 11%, valor sumamente bajo que indica fuertes variaciones en las posiciones del ranking como se muestra en la figura 12.

La figura 13 indica que para en el ensayo de alta densidad no hay diferencias significativas en el valor genético del volumen total para ninguno de los materiales evaluados.

La figura 14 por otra parte muestra que el clon 35E es estadísticamente diferente al testigo y a los últimos 7 clones evaluados en el ensayo.

En cuanto a la ganancia genética en volumen total se presenta el valor de 13,33% y 15,39% en el ensayo de alta y baja densidad, respectivamente.

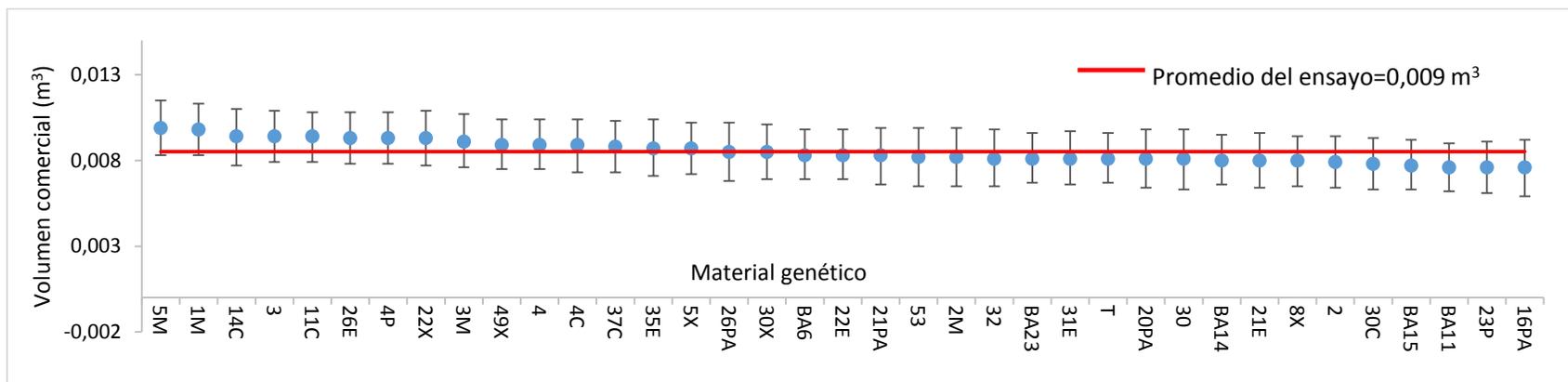


Figura 13. Ranking genético para el volumen total (m³) en un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

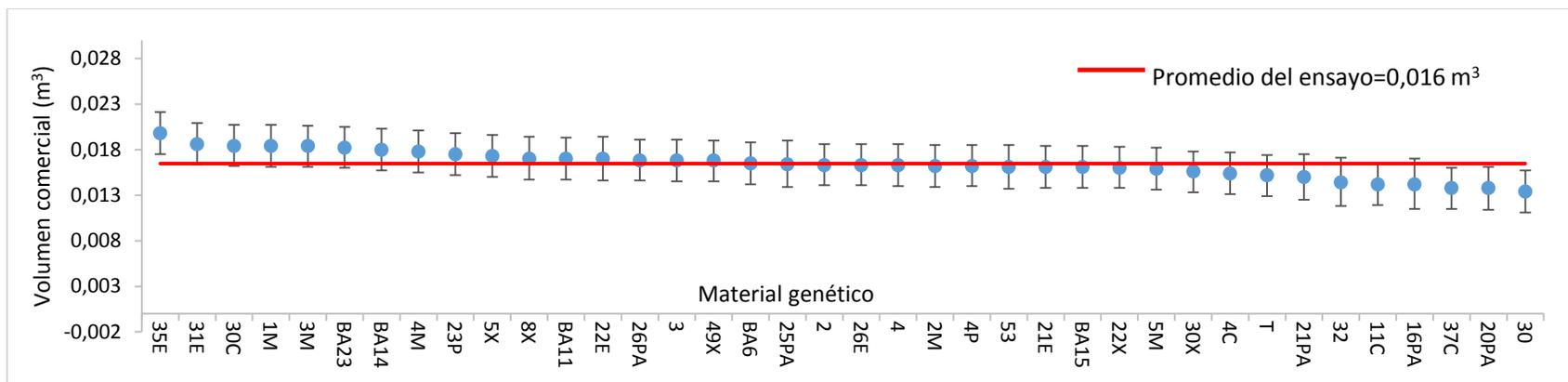


Figura 14. Ranking genético para el volumen total (m³) para un ensayo clonal de *Tectona grandis* plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

Análisis del material por empresa

Al realizar el análisis de los clones que aportó cada empresa miembro de la Cooperativa GENFORES y de la mezcla de clones DR se muestra una tendencia similar a la esperada donde el material DR es superior significativamente a todos las demás (figuras 15 y 16). El cuadro 14 presenta los valores en los parámetros genéticos con el material DR y sin este, se observa como los valores de heredabilidad media, individual y de exactitud disminuyen de forma considerable al excluirlo.

Cuadro 14. Comparación de los parámetros genéticos por empresa para el volumen total (m^3) en dos ensayos clonales de *Tectona grandis* con diferente densidad de siembra a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (con y sin el material DR).

Parámetros	10 empresas		9 empresas	
	Alta densidad	Baja densidad	Alta densidad	Baja densidad
Vg	0,00	0,00	0,00	0,00
Vparc	0,00	0,00	0,00	0,00
Ve	0,00	0,00	0,00	0,00
Vf	0,00	0,00	0,00	0,00
h²g	0,19±0,04	0,25±0,05	0,03±0,02	0,03±0,02
c²parc	0,01	0,03	0,01	0,02
h²mp	0,98	0,96	0,76	0,77
Acproc	0,99	0,98	0,87	0,88
Media general	0,0093	0,0175	0,0085	0,0164

Vg = varianza genotípica entre poblaciones; Vparc = varianza ambiental entre parcelas; Ve = varianza residual; Vf = varianza fenotípica individual; h²g = heredabilidad individual en sentido amplio, es decir, de los efectos genotípicos totales de poblaciones; c²parc = coeficiente de determinación de los efectos de parcela; h²mp = heredabilidad del promedio de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Acproc: exactitud de la selección de poblaciones, asumiendo una supervivencia completa; Media = estimado de la media general para el carácter.

Los resultados sin el material DR presentan buenos datos de exactitud para la predicción de los parámetros. Se observa que los resultados por empresa son muy similares entre ensayos, a pesar que el análisis individual por clones presentó al ensayo de baja densidad con parámetros mucho más altos.

En el ensayo de alta densidad existe una leve diferencia significativa de la empresa MAC respecto a BA (figura 17), para el ensayo de baja densidad y a pesar que los

parámetros genéticos son casi idénticos se observa que no existen diferencias significativas entre estas (figura 18).

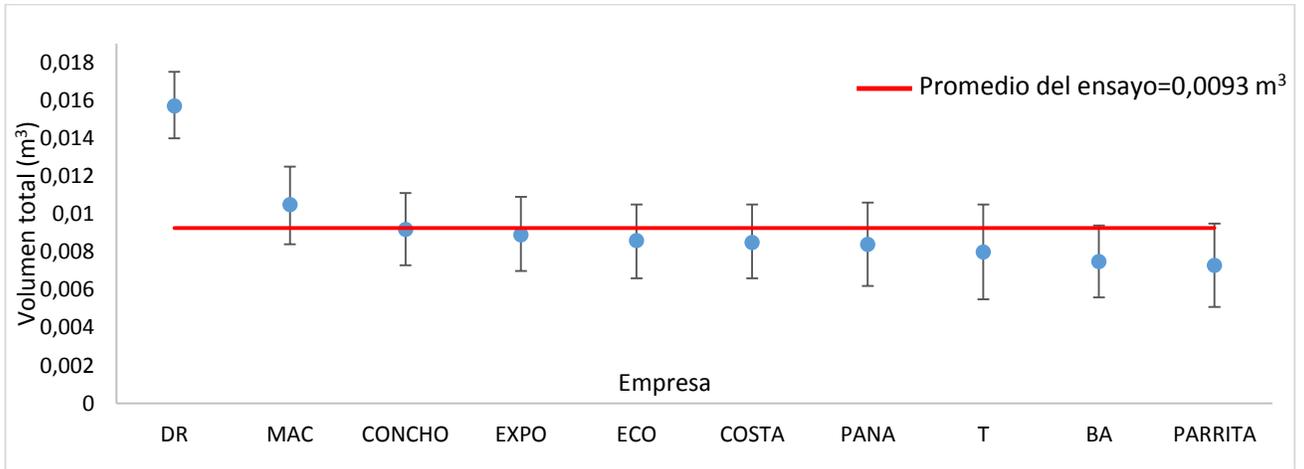


Figura 15. Ranking genético del volumen total de teca (*Tectona grandis* L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

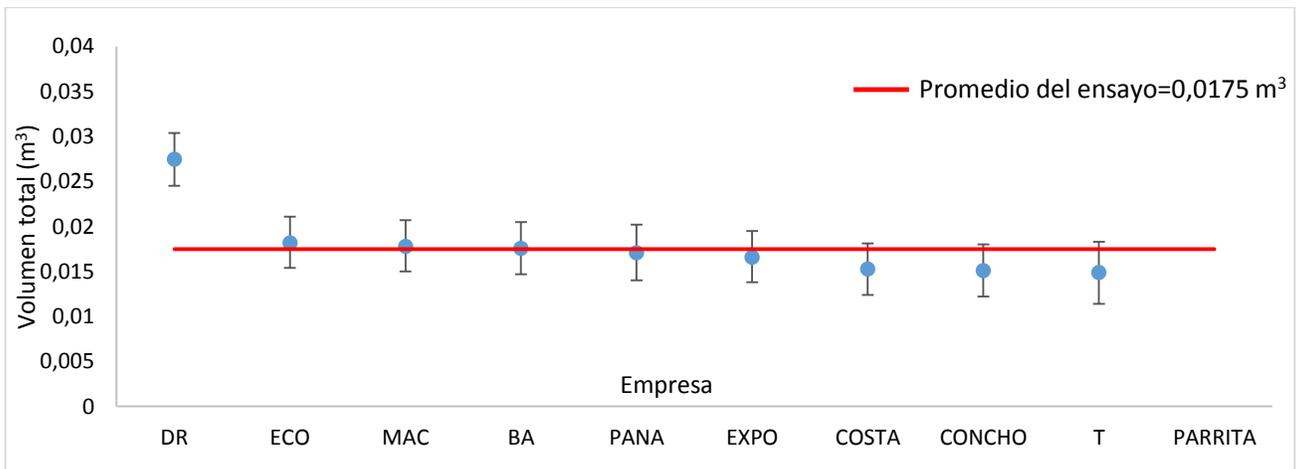


Figura 16. Ranking genético del volumen total teca (*Tectona grandis* L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua.

El poco traslape entre los límites de confianza permite afirmar la superioridad del material MAC respecto a PARRITA y BA para el ensayo de alta densidad. El material ECO presenta superioridad respecto a COSTA, CONCHO y PARRITA en el ensayo de baja densidad.

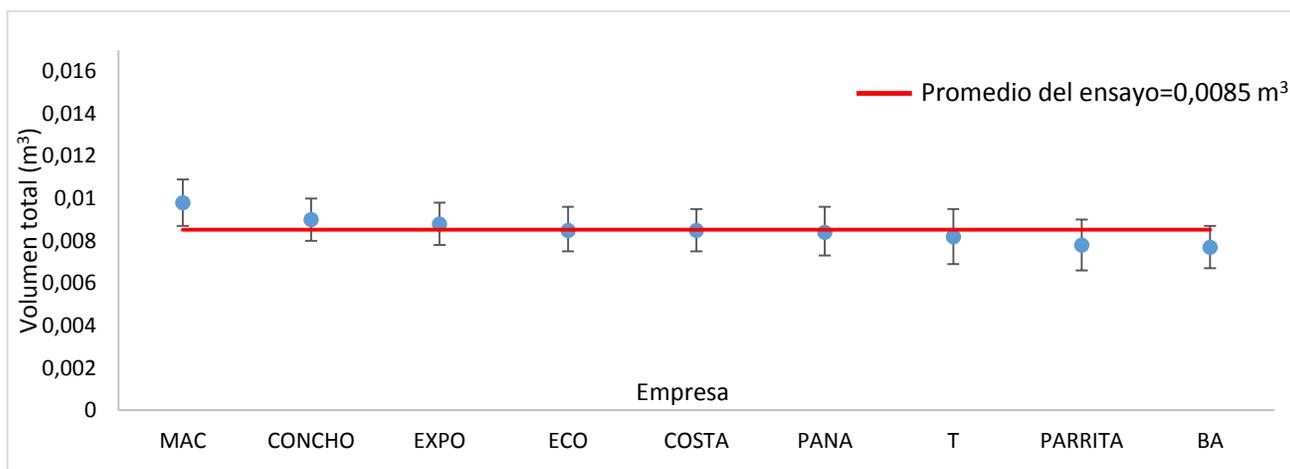


Figura 17. Ranking genético del volumen total de teca (*Tectona grandis* L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 1,5 m x 1,5 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

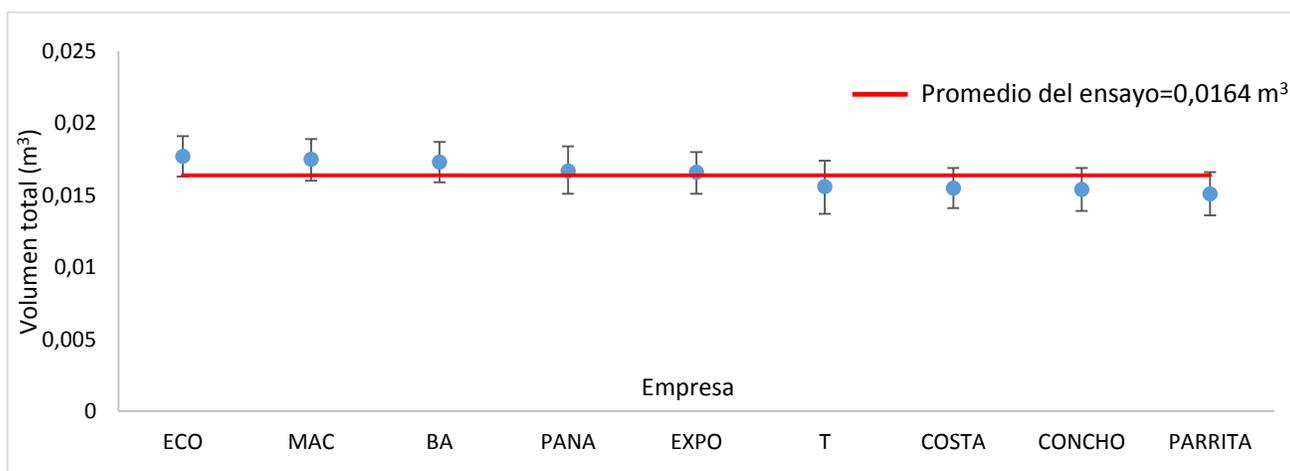


Figura 18. Ranking genético del volumen total de teca (*Tectona grandis* L.f) por empresa en un ensayo clonal, plantado a 3 m x 3 m a los 22 meses de edad, en Siuna, RAAN, Nicaragua (material GENFORES).

Análisis en el tiempo para el DAP

El diámetro a la altura pecho es un valor con alta exactitud debido a la medición directa que se realiza; la altura, tiende a presentar mayor error debido a la estimación de trozas, la cual depende en gran medida de la habilidad y la experiencia de quién la realiza, por este motivo el análisis en el tiempo se presenta únicamente para el DAP, de esta forma se brinda un análisis mucho más limpio y con la mínima cantidad de sesgo. Este análisis se realiza con la colección clonal GENFORES.

A partir de la información recolectada por Loría (2016) se compararon los datos de las mediciones realizadas a los 13 meses en contraste a la medición a los 22 meses, se obtuvo valores de incremento de 1,93 cm en el ensayo de alta densidad, el clon con mayor incremento es el 14C con 2,49 cm, los 10 mejores clones en el ranking presentan un incremento promedio de 2,15 cm.

El ensayo de baja densidad presentó un incremento promedio de 3,63 cm; los clones con mejor incremento fueron 35E y 31E con 4,27 y 4,19 cm, respectivamente. El valor promedio de incremento para los 10 mejores clones fue de 4,00 cm.

El cuadro 15 presenta los parámetros genéticos para el DAP en dos ensayos de teca a diferente densidad de siembra en dos periodos, se observa que la varianza genética disminuye para el ensayo de alta densidad pero aumenta considerablemente en el de baja densidad lo cual indica que las diferencias entre los clones se hacen más visibles para este ensayo. De igual forma la interacción entre ambos sitios se hace menos fuerte y así lo demuestra el valor de correlación genética el cual desciende drásticamente en un periodo de 9 meses, es decir que los mejores genotipos tienden a coincidir cada vez menos entre ensayos.

Un análisis más detallado se puede ver en las figuras 19, 20, 21 y 22; en el ensayo de alta densidad los materiales se vuelven más semejantes entre ellos tal como lo demuestra la disminución en varianza genética, efecto opuesto se encuentra en el ensayo de baja densidad, donde hubo un aumento considerable en varianza genética y se ve reflejado en las diferencias entre los clones.

Cuadro 15. Parámetros genéticos obtenidos para el DAP, a los 13 y 22 meses de edad en dos ensayos clonales de teca a diferente densidad de siembra en Siuna, RAAN, Nicaragua.

Parámetros	13 meses			22 meses		
	1.5x1.5	3x3	Interacción	1.5x1.5	3x3	Interacción
Vg	0,04	0,02	0,02	0,03	0,15	0,01
Vparc	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01
Vint	---	---	0,02	---	---	0,08
Ve	0,55	0,74	0,64	0,97	1,52	1,29
Vf	0,61	0,78	0,70	1,00	1,70	1,40
h²g	0,06±	0,03±	0,03±	0,03±	0,09±	0,01±
	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01
c²int	---	---	0,03	---	---	0,06
h²mc	0,60	0,39	0,45	0,39	0,73	0,16
Exactitud	0,77	0,63	0,67	0,62	0,85	0,40
Rgloc	---	---	0,53	---	---	0,13
CVgi%	4,45	3,51	3,32	2,52	4,87	1,59
CVe%	8,95	10,66	9,92	7,72	7,34	7,28
CVr	0,50	0,33	---	0,33	0,66	---
SEP	0,12	0,12	0,11	0,13	0,20	0,10
Media general	4,43	4,26	4,34	6,44	7,89	7,16

Vg= Varianza genotípica; Vparc= Varianza ambiental entre parcelas; Vint= Varianza de la interacción genotipo ambiente; Ve= Varianza residual; Vf= Varianza fenotípica total; h²g= Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int= Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc= Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon= Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc= Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP= Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi%= Coeficiente de variación genotípica; CVe%= Coeficiente de variación residual; Media general= Estimado de la media poblacional.

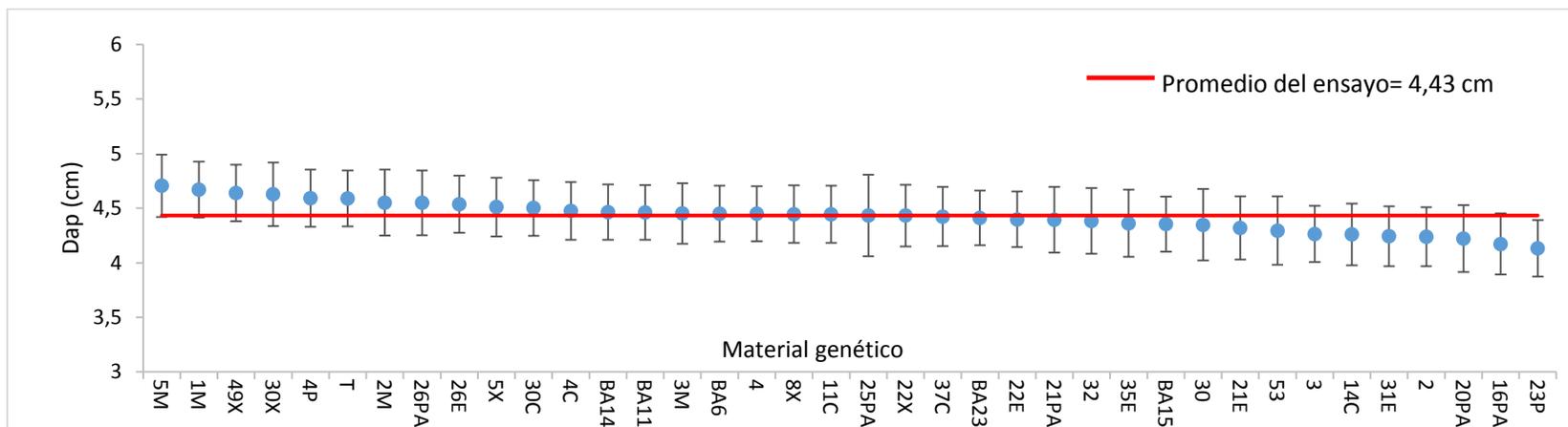


Figura 19. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 13 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

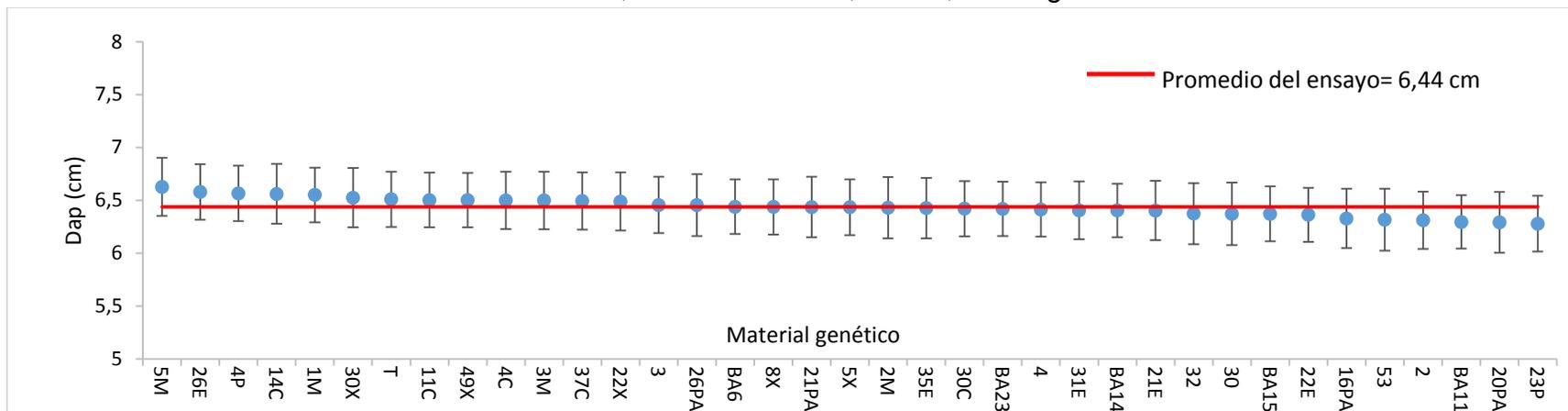


Figura 20. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, a los 22 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

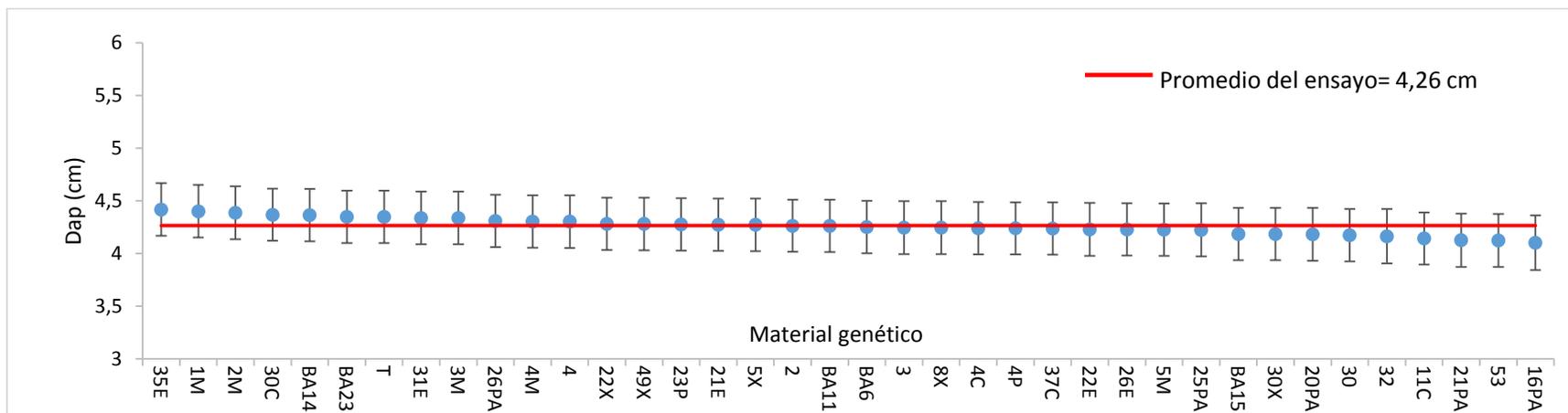


Figura 21. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, a los 13 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

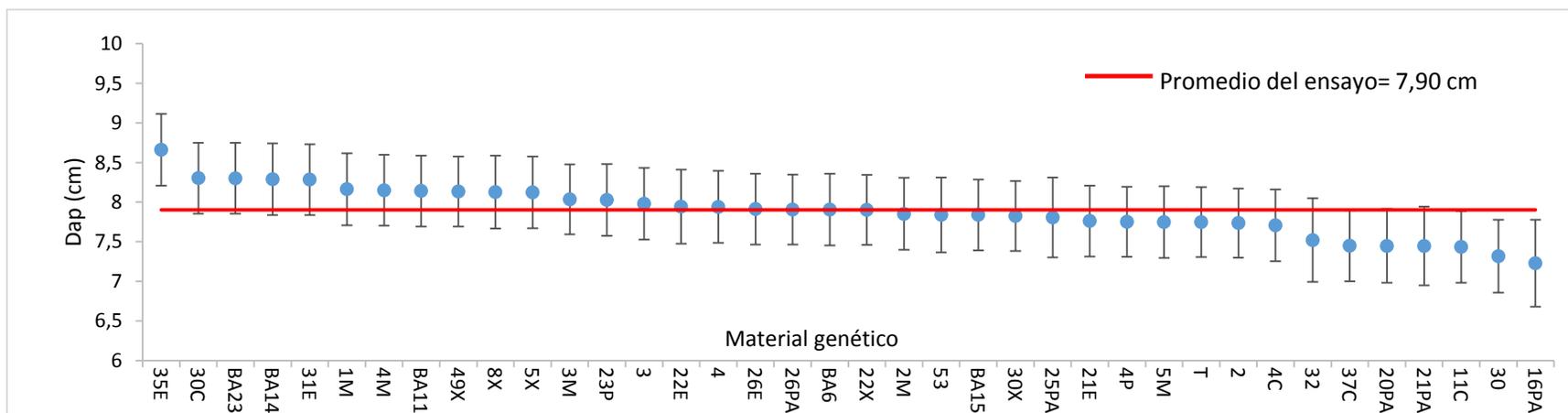


Figura 22. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, a los 22 meses de edad, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

Tal como indican las figuras 21 y 22 las diferencias estadísticas entre materiales para el ensayo de baja densidad se presentan en el periodo de 13 a los 22 meses de edad, el clon 35E presenta diferencia significativa respecto a los últimos 12 materiales en el ranking, dentro de los cuales se encuentra el material testigo.

La figura 23 visualiza en el ensayo de alta densidad clones estables, así como interacciones simples y complejas, se presenta un alto grado de inestabilidad en el ensayo a pesar del periodo tan corto entre las dos evaluaciones. Además, el testigo continúa ubicándose en la categoría de mediano rendimiento.

El ensayo de baja densidad en la figura 24 indica que el material 35E, se mantiene en la primera posición del ranking, por otra parte, el testigo se desplaza de una categoría de mediano rendimiento a una de bajo rendimiento.

13 meses		22 meses	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	5M	1	5M
2	1M	2	26E
3	49X	3	4P
4	30X	4	14C
5	4P	5	1M
6	T	6	30X
7	2M	7	T
8	26PA	8	11C
9	26E	9	49X
10	5X	10	4C
11	30C	11	3M
12	4C	12	37C
13	BA14	13	22X
14	BA11	14	3
15	3M	15	26PA
16	BA6	16	BA6
17	4	17	8X
18	8X	18	21PA
19	11C	19	5X
20	25PA	20	2M
21	22X	21	35E
22	37C	22	30C
23	BA23	23	BA23
24	22E	24	4
25	21PA	25	31E
26	32	26	BA14
27	35E	27	21E
28	BA15	28	32
29	30	29	30
30	21E	30	BA15
31	53	31	22E
32	3	32	16PA
33	14C	33	53
34	31E	34	2
35	2	35	BA11
36	20PA	36	20PA
37	16PA	37	23P
38	23P		

Figura 23. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 1,5 m x 1,5 m, en dos periodos, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

13 meses		22 meses	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	35E	1	35E
2	1M	2	30C
3	2M	3	BA23
4	30C	4	BA14
5	BA14	5	31E
6	BA23	6	1M
7	T	7	4M
8	31E	8	BA11
9	3M	9	49X
10	26PA	10	8X
11	4M	11	5X
12	4	12	3M
13	22X	13	23P
14	49X	14	3
15	23P	15	22E
16	21E	16	4
17	5X	17	26E
18	2	18	26PA
19	BA11	19	BA6
20	BA6	20	22X
21	3	21	2M
22	8X	22	53
23	4C	23	BA15
24	4P	24	30X
25	37C	25	25PA
26	22E	26	21E
27	26E	27	4P
28	5M	28	5M
29	25PA	29	T
30	BA15	30	2
31	30X	31	4C
32	20PA	32	32
33	30	33	37C
34	32	34	20PA
35	11C	35	21PA
36	21PA	36	11C
37	53	37	30
38	16PA	38	16PA

Figura 24. Ranking genético para el DAP (cm) en un ensayo clonal de teca, plantado a 3 m x 3 m, en dos periodos, localizado Siuna, RAAN, Nicaragua.

DISCUSIÓN

Parámetros genéticos en el ensayo de alta y baja densidad

A la edad de 22 meses se obtienen valores de heredabilidad media clonal de 96% y 97% para el DAP y el volumen total respectivamente en el ensayo de alta densidad y de 93% y 90% en los mismos caracteres para el otro ensayo, valores sumamente altos si se comparan con el informe de Pérez (2016) el cual obtuvo valores para este mismo parámetro de 79% y 76% en un ensayo de teca localizado en Darién de Panamá evaluado a los 5,9 años edad, para el DAP y volumen comercial, respectivamente. Además este mismo autor presenta valores de 86% y 85% para estos mismos caracteres en un ensayo de teca localizado en el Pacífico de Costa Rica a los 5,4 años, resultados que respaldan la alta heredabilidad media para estos caracteres presentes en los ensayos de Nicaragua.

Los resultados para la heredabilidad individual muestran tendencias diferentes con valores mayores en el ensayo de baja densidad de 14% y 16% para el DAP y el volumen total respectivamente, para el otro ensayo se encontró valores de 11% y 12% para los mismos caracteres, al comparar estos resultados con los obtenidos por Pérez (2016) (14,50% para el DAP y 13,70% para el volumen comercial) en el ensayo de teca localizado en el Pacífico de Costa Rica se puede notar que el ensayo de alta densidad no supera los datos expuestos por ese autor pero el de baja densidad presenta un aumento en el volumen. Por otra parte, los valores obtenidos por este autor en el ensayo de Panamá (9% para el DAP y 7,10% para el volumen comercial) si permiten afirmar mejores resultados para los ensayos evaluados en este informe.

La heredabilidad individual obtenida en el ensayo de alta densidad para el volumen total y DAP son similares a las encontradas por Goh, Japarudin, Lapammu, Flori, y Monteuuis (2013). Por otra parte, las heredabilidades media en estos caracteres son sumamente altas si se analiza cada ensayo por aparte, pero se reducen drásticamente cuando se analizan en conjunto los dos ensayos, lo cual indica que el potencial genético de los clones se ve afectado por la variable densidad en una evaluación a los 22 meses de edad.

Goh y otros (2013) también mencionan que al analizar la heredabilidad individual en dos ensayos genéticos de teca se mejoran estos valores respecto al análisis individual, situación inversa sucede en este estudio, pero, explicada por la peculiaridad de diferencias en la densidad de siembra, los clones presentan diferente rendimiento según densidad de siembra tal como lo comprueban la figura 12 y el valor de correlación bajo para el volumen total (cuadro 10).

Tanto el DAP como el volumen total obtienen resultados muy similares en los parámetros genéticos si se comparan individualmente en ambos ensayos, misma tendencia es presentada por el estado fitosanitario y la altura total, los cuales indican de forma general que la expresión genética de todas estos caracteres es similar entre ensayos.

La heredabilidad media y la predicción en las estimación de los parámetros alcanzan valores muy altos para el número de ramas (83% y 91%, respectivamente), este caracter no pudo ser analizado en el ensayo de alta densidad debido al pobre valor de exactitud presentado; en este caso, diferencias en los parámetros genéticos indican directamente que el factor densidad influye en este caracter y por lo tanto en su expresión genética, por otra parte, el número de ramas es un caracter altamente afectado por la densidad de siembra de los árboles (Noda & Martín, 2008).

El diámetro promedio es más alto para el ensayo de baja densidad, efecto inverso y poco esperado para la altura total, valores que pueden ser explicados por el estrés de los árboles al ser plantados a una densidad tan alta, cuya respuesta podría estar explicada en el valor de bifurcación promedio del ensayo de alta densidad que ronda cerca del 50% debido en su gran mayoría a pudriciones en el ápice. Por otra parte, un valor de exactitud de 75% permitió que la bifurcación se analizara en el ensayo de alta densidad no así para el de baja densidad debido al bajo valor obtenido en este parámetro (28%) lo cual permite deducir que la expresión genética de este caracter está relacionado al factor densidad.

La superioridad de la mezcla de clones DR se puede observar en las figuras 9 y 10 donde la ganancia genética en volumen total le permite obtener diferencias significativas respecto a todos los materiales evaluados en ambos ensayos, estos

resultados son muy ventajosos para un programa de mejoramiento genético. El material DR es de muy alto rendimiento y proviene de un programa de mejoramiento genético en Malasia, este material fue introducido en América latina a través de Brasil y ha presentado una alta tasa de éxito, como lo mencionan Monteuis y otros (2011), citado por Loría (2016).

Ganancia genética

La ganancia genética está determinada por el control genético del carácter evaluado y por la variabilidad genética existente en el ensayo (Espitia M. , Murillo, Castillo, Araméndiz, & Paternina, 2010), en este caso al ser ensayos similares, diferencias en ganancias genéticas son expresadas por la densidad de la plantación y el comportamiento de los genotipos según este factor.

Para el ensayo de alta densidad si se analizan los mejores diez clones en el ranking genético en contraste al material testigo se logra obtener una ganancia genética de 38,38%, en relación con el volumen total. La ganancia genética obtenida en el DAP para los 10 mejores clones en el ranking es de 8,29%. Para un turno de rotación de 18 años la ganancia genética permite acortar 1,49 años, se obtienen los mismos resultados pero a la edad 16,51 años.

En el ensayo de baja densidad y respecto al volumen total, si se analizan los mejores diez clones en el ranking genético en contraste al material testigo se logra obtener una ganancia genética de 31,93%. La ganancia genética obtenida en el DAP para los 10 mejores clones en el ranking es 10,88% respecto al testigo evaluado, esto conlleva a una disminución de 1,96 años en el turno de cosecha.

Estos valores indican resultados altamente satisfactorios para un programa de mejoramiento genético, se aprecia que las ganancias genéticas para cada carácter varían en cierta proporción de un ensayo a otro, esto por el factor densidad, independientemente el alto porcentaje de ganancia es respaldado mediante la comparación con el estudio de Espitia, Murillo y Castillo (2011), los cuales mencionan que se esperan ganancias genéticas de 5,52% para el DAP y 41,71% para el volumen comercial en relación a la selección de árboles plus en más de 5316 ha comerciales de teca.

Por otra parte, al comparar con el estudio de Muslimin, Sofyan, e Islam (2013), los cuales presentan valores de ganancia genética para el DAP y el volumen total de 2,80% y 10,65% en un ensayo clonal de teca al sur de Sumatra, en Indonesia, donde se evaluaron 35 clones a la edad de 5,5 años, se puede evidenciar la gran diferencia en ganancia genética, por lo tanto los beneficios atribuibles al uso de los mejores 10 clones evaluados en los dos ensayos en este estudio.

Murillo (1992), menciona que valores más altos en ganancia genética, así como una disminución mayor en el turno de cosecha son reflejo de una buena selección de los materiales a evaluar, los cuales permiten obtener resultados satisfactorios mediante una amplia y correcta evaluación y selección de árboles plus las ganancias esperadas aumentan considerablemente.

Análisis integrado de los ensayos

Se obtuvo valores de correlación genética muy semejantes entre el DAP, volumen total y altura; estos valores indican que existe una variante baja en el rendimiento de algunos genotipos si se considera que son ensayos similares, por otra parte, valores de correlación bajos indican que los materiales genéticos presentan rendimientos diferentes según el ensayo que se evalúe, es decir, el factor densidad de siembra influye en la expresión genética de estos materiales para una evaluación a los 22 meses de edad.

El número de ramas presenta un bajo valor de heredabilidad media clonal, efecto que podría estar explicado por el pobre valor de exactitud obtenido en el ensayo de alta densidad presentado en el cuadro 9. Este carácter presenta una baja correlación genética entre sitios, el factor densidad también influye en este carácter y por lo tanto en su expresión genética.

El estado fitosanitario también obtiene una correlación genética baja, es decir que los genotipos que presentan algún problema fitosanitario no tienden a ser los mismos entre ensayos, la explicación de este fenómeno podría estar referida al estrés que presentan los árboles en el ensayo de alta densidad lo cual conlleva a una expresión genética diferente.

Al comparar la evaluación individual de cada ensayo respecto a la evaluación en conjunto se observa una reducción en los estimados genéticos para el DAP y el volumen total; el valor de exactitud en la predicción de los parámetros así como la heredabilidad media e individual muestran un descenso considerable lo cual está explicado en el factor densidad que conlleva a una expresión genética diferente para estos caracteres evaluados a los 1,82 años.

El comportamiento de los materiales genéticos según categorías de rendimiento indica que la mezcla de clones DR se mantiene como en una categoría de alto rendimiento en ambos ensayos, únicamente el clon 35E logra posicionarse junto al DR como material de alto rendimiento para el ensayo de baja densidad, a pesar que el material DR es estadísticamente superior a este clon es importante mencionar que debido a la corta edad de evaluación los demás clones podrían no presentar su máximo potencial genético (Badilla y Murillo, 2012).

Análisis de la colección GENFORES (respecto al material DR).

La influencia de la mezcla de clones DR en la predicción de los parámetros genéticos es sumamente alta, así lo indican los cuadros 11 y 12 que muestran estos resultados, para el ensayo de alta densidad sólo dos caracteres de un total de ocho lograron obtener un valor de exactitud mayor a 0,6, el DAP y el volumen total, pero aun así los valores de heredabilidad media e individual muestran valores muy bajos al compararlos con el análisis realizado con el material DR.

Para el ensayo de baja densidad se permite el análisis de mayor número de caracteres debido a los valores de exactitud, los cuales aumentan junto con las heredabilidades si se compara al ensayo de alta densidad.

La evaluación en conjunto para ambos ensayos demuestra una disminución drástica en los estimados genéticos, los pobres valores de correlación permiten inferir que el rendimiento genético de los clones presenta grandes cambios según la densidad en la que se plante.

La reducción fue mucho más significativa en el ensayo de alta densidad, se explica por la cantidad de observaciones en los ensayos, la mortalidad presente en ambos fue alta y se utilizó al material DR como material de repuesto para rellenar los

huecos que dejaban estos árboles, el ensayo de alta densidad presentó mayor mortalidad y por lo tanto, una sobre representación del material DR en este ensayo; la muerte de unidades de observación (clones) puede influir en gran medida sobre los estimados genéticos, dado que la exactitud de cualquier valor está relacionada al número de repeticiones (Zamudio & Guerra, 2002), (Flores, López, & Valencia, 2014). Además la variación estándar del valor genotípico estimado es mayor para cada ensayo cuando se analiza con y sin el material DR.

Se encontraron 285 repeticiones para el material DR en el ensayo de alta densidad y 64 para el de baja densidad, lo cual corresponde a un 30,44% del total del ensayo y 7,16% respectivamente para ambos ensayos, cuando lo normal es que haya 24 repeticiones por material en cada ensayo. Estos valores refuerzan la idea de que la pérdida de unidades experimentales pudo influenciar los estimados genéticos.

El ensayo de baja densidad presenta dos genotipos en la categoría de alto rendimiento mientras el otro ensayo es mucho más permisivo con 8 clones presentes. Las pocas diferencias entre los valores genéticos para los clones en el ensayo de alta densidad permiten ampliar esta categoría.

Las diferencias en valores genéticos para los primeros dos clones en el ensayo de baja densidad desplazan los demás materiales; es decir, este ensayo permite una expresión genética mayor para estos dos genotipos y especialmente para el clon 35E, el cual presenta diferencia significativa en comparación al testigo.

Ganancia genética para la colección GENFORES

Se presenta el valor de 13,33% y 15,39% para el volumen total en el ensayo de alta y baja densidad respectivamente, estos valores son superiores respecto al estudio de Pérez (2016) para un ensayo clonal de teca en Darién de Panamá a los 5,9 años (9,3%), y superiores respecto a un ensayo clonal de teca al sur de Sumatra, en Indonesia donde se evaluaron 35 clones a la edad de 5,5 años, en cuyo estudio se obtuvo el valor de 10,65% de ganancia genética para el volumen total (Muslimin, Sofyan, & Islam, 2013).

Por otra parte, Pérez (2016) evaluó un ensayo clonal de teca a los 5,4 años donde encontró grandes ganancias genéticas para el volumen comercial (88,7%), aunque

hay que considerar que las diferencias de edad pueden influir en los resultados de una forma desfavorable para los ensayos localizados en Nicaragua, dado que como lo mencionan Badilla y Murillo (2012) la expresión genética puede ser afectada por una corta edad de evaluación.

Análisis de los clones por empresa

El material por empresa muestra una tendencia similar al análisis que se ha realizado junto con la mezcla de clones DR, la superioridad de este es estadísticamente diferente a todos los demás materiales, por este motivo se realizó un análisis excluyéndolo, de esta forma se determinó que en el ensayo de baja densidad no hay una diferencia estadística entre empresas a pesar que en el análisis individual de los clones se presentó al clon 35E con diferencia significativa respecto al testigo, situación inversa es encontrada por Badilla y Murillo (2012) quienes muestran que las mejores dos procedencias (empresas) en el ranking no presentan a sus clones individuales con diferencias significativas entre los demás materiales debido a que algunos de sus clones se presentaban en las primeras posiciones y otros en las últimas.

Para el ensayo de alta densidad se encuentra diferencia estadística entre la empresa MAC respecto a BA, pero a nivel de clon individual no existen diferencias, lo cual puede estar referido a la inestabilidad de los demás clones dentro de esta, donde las diferencias en el volumen total entre estos clones generan un promedio bajo para una empresa.

Análisis en el tiempo para el DAP

El valor promedio para el DAP es mayor en el ensayo de alta densidad según lo demuestran los datos a los 13 meses de edad, efecto inverso para los datos a los 22 meses donde se indica que el mayor crecimiento promedio se encuentra en el ensayo de baja densidad, tal como lo mencionan Suatunce, Díaz, y García (2010), se esperan valores de diámetro mayores conforme menor es la densidad de siembra.

El ensayo de alta densidad muestra una disminución en los parámetros genéticos, por otra parte, hay una mejoría en el parámetro de heredabilidad media del clon,

para el ensayo de baja densidad, tendencia similar se observa en el informe realizado por Pérez (2016), cuyos resultados a través del tiempo para dos ensayos de teca mostraron mejorías en este parámetro.

Para el DAP y volumen comercial Callister (2013) y Pérez (2016) mencionan que los ensayos mantienen alta estabilidad en las heredabilidades después de los 3 años de edad; por lo tanto, cambios fuertes como los presentados en este informe pueden estar relacionados al factor edad.

Resultados similares son encontrados en la heredabilidad individual, la cual disminuye tres puntos porcentuales en el ensayo de alta densidad mientras que en el otro ensayo aumenta seis puntos; es decir, la heredabilidad individual toma tendencias similares a la heredabilidad media del clon pero no se observa una tendencia de mejoría general en el tiempo para ambos ensayos, por lo tanto, se necesitan de mayor cantidad de observaciones en el tiempo para poder afirmar que estos parámetros efectivamente se comportan de forma inusual dado que como lo mencionan Ávila, Murillo, Murillo, y Sandoval (2015) la temprana edad de análisis puede influenciar los resultados en los parámetros genéticos.

La correlación entre sitios para el DAP disminuye con el tiempo, lo cual indica que las diferencias entre los ensayos se están intensificando, es decir, las posiciones en el ranking para los genotipos cambian para cada ensayo por separado, de esta forma se demuestra que el factor densidad influye en los valores genéticos de los materiales evaluados.

La idea original para el establecimiento de los ensayos propone que las diferencias en los primeros años de evaluación son debidas al factor densidad, la hipótesis asume que al aumentar la densidad se permite la obtención de selección genética a temprana edad, lo cual es contradictorio a los resultados presentados a los 13 y 22 meses de edad; por otra parte, para poder afirmar esta hipótesis se necesita obtener la estabilización de los parámetros genéticos en ambos ensayos y además un alto grado de correlación.

CONCLUSIONES

Se presenta altos valores de heredabilidad media y de precisión en la estimación de los parámetros genéticos para el DAP y el volumen total en los dos ensayos evaluados a los 22 meses de edad.

Existe diferencia estadística en el valor genético del volumen total para la mezcla de clones DR en ambos ensayos respecto a todos los materiales evaluados.

El ensayo de baja densidad presenta al material DR y el clon 35E como materiales de alto rendimiento.

La evaluación de los ensayos a los 22 meses de edad muestra diferencia en los caracteres evaluados debido a la densidad de plantación.

La baja correlación genética entre ensayos para el volumen total indica poca similitud entre los rankings genéticos, por lo tanto no se mantienen los mismos clones en las diferentes categorías de rendimiento.

El análisis por empresa presenta a la mezcla de clones DR con diferencias significativas entre todas las demás para ambos ensayos.

El análisis de los ensayos sin el material DR indica una alta influencia de este en los parámetros genéticos.

El material de la empresa MAC presenta una leve diferencia significativa respecto a la empresa BA para el ensayo de alta densidad (colección GENFORES).

El poco traslape entre los límites de confianza permite afirmar la superioridad del material MAC respecto a PARRITA y BA para el ensayo de alta densidad.

El material ECO presenta superioridad respecto a COSTA, CONCHO y PARRITA en el ensayo de baja densidad.

El análisis en el tiempo para el DAP indica la presencia de una leve diferencia significativa en el ensayo de baja densidad para el clon 35E respecto al material testigo (colección GENFORES).

La correlación genética entre ensayos disminuye en el tiempo para el DAP.

RECOMENDACIONES

Es necesario continuar con análisis en los dos ensayos genéticos para determinar si se presenta correlación genética alta y en qué edad sucede este fenómeno.

El uso de vara telescópica permite una lectura mucho más precisa para la altura total, de esta forma los análisis realizados permiten ser manejados con la mayor exactitud posible.

REFERENCIAS

- Araúz, J. (2005). *Evaluación de daños post-aprovechamiento mejorado del Bosque Tropical Húmedo, en la finca Susun, comunidad de San Martín, Siuna, RAAN, Nicaragua*. Universidad Nacional Agraria , Managua .
- Arguedas, M., Rodríguez, M., & Guevara, M. (2015). Plagas y enfermedades en plantaciones de teca en Centroamérica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Guayaquil, Ecuador.
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O., & Sandoval, C. (Julio de 2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana: Kurú*, 12(29), 2-14.
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2012). *Evaluación del comportamiento de clones de teca (Tectona grandis) en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Callister, A. (2013). Genetic parameters and correlations between stem size, forking, and flowering in teak (*Tectona grandis*). *Canadian Journal of Forest Research*, 43(12).
- Camino, R., & Morales, J. P. (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*. Turrialba: CATIE.
- Darwin, A. (2013). *Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) para dos especies, teca (Tectona grandis) y melina (Gmelina arborea) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac CA. en la provincia de los ríos*. Tesis de pregrado, Escuela Superior Plotécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Resende, d.M (2002). Software SELEGEN-REML/BLUP. 1. Colombo, Paraná, Brasil: Embrapa Florestas.
- Espitia, M., Murillo, O., & Castillo, C. (2011). Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.f.) en Córdoba (Colombia). *Colombia Forestal*, 14(1), 81-90.
- Espitia, M., Murillo, O., Castillo, C., Araméndiz, H., & Paternina, N. (2010). Ganancia genética esperada en la selección de Acacia (*Acacia mangium* Willd.) en Córdoba (Colombia). *Actualidad y Divulgación Científica*, 13(2), 99-107.
- Flores, C., López, J., & Valencia, S. (2014). *Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y/o progenies*. Comisión Nacional Forestal, Zapopan.
- Goh, D., Japarudin, Y., Lapammu, M., Flori, A., & Monteuuis, O. (2013). Growth differences and genetic parameter estimates of 15 teak (*Tectona grandis* L.f.)

- genotypes of various ages clonally propagated by microcuttings and planted under humid tropical conditions. *Silvae Genetica*, 62(4-5), 196-206.
- Loría, J. (2016). *Posibilidad de selección genética temprana en teca (Tectona grandis L.f) en la empresa MLR Forestal, Siuna, RAAN, Nicaragua*. Artículo científico, Instituto Tecnológico de Costa Rica , Cartago.
- Monteuuis, O., Gog, D., García, C., Alloysius, D., Gidiman, J., Bacilieri, R., & Chaix, G. (2011). Genetic variation of growth and tree quality traits among 42 diverse genetic origins of *Tectona grandis* planted under humid tropical conditions in Sabah, East Malaysia. *Tree Genetics and Genomes*(7), 1263-1275.
- Murillo, O. (1992). Metodología para diseño y el establecimiento de rodales semilleros. *Tecnología en Marcha*, 11(Número especial), 1-4.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004a). *Breeding teak in Costa Rica*. IUFRO Meeting, Forest Genetics and Genomics, Charleston, South Carolina, USA.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004b). Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago.
- Murillo, O., Badilla, Y., & Rojas, F. (2010). GENFORES, desde el TEC hacia el desarrollo empresarial internacional. *Investiga.TEC*(9), 10-11.
- Murillo, O., Badilla, Y., Villalobos, M., & Rojas, F. (2013). *Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón*. Proyecto de Investigación.
- Murillo, O., Wright, J., Monteuuis, O., & Montenegro, F. (2013). *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. Turrialba: CATIE.
- Muslimin, I., Sofyan, A., & Islam, S. (2013). Genetic Parameter Estimates in a Clonal Test of Teak (*Tectona grandis* L. F) at 5,5 Years Old in South Sumatera. *Jurnal Pemuliaan Tanaman Hutan*, 7(2), 97-106.
- Noda, Y., & Martín, G. (2008). Efecto de la densidad de siembra en el establecimiento de morera para su inclusión en sistemas ganaderos. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 339-341.
- Pastrana, I., Espítia, M., & Murillo, O. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 3-5.
- Pastrana, L. (2011). *Potencial genético de Acacia mangium*. Tesis maestría , Universidad de Córdoba, Facultad de ciencias agrícolas , Córdoba.

- Pérez, R. (2016). *Evaluación de ensayos genéticos de teca (Tectona grandis L.f.) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A.* Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica , Cartago.
- Salas, R. (2012). *Evaluación de un ensayo genético de Gmelina arborea en Siquirres, Limón.* Tesis de pregrado, Tecnológico de Costa Rica , Cartago.
- Suatunce, P., Díaz, G., & García, L. (2010). Efecto de la densidad de plantación en el crecimiento de cuatro especies forestales tropicales. *Ciencia y Tecnología*, 3(1), 23-26.
- Tamarit, J., De los Santos, H., Aldrete, A., Valdez, R., Ramírez, H., & Guerra, V. (2013). Sistema de cubicación de árboles individuales de *Tectona grandis* L.f mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* , 5(21).
- Vallejos, J., Badilla, Y., Picado, F., & Murillo, O. (2010). Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense*, 34(1), 107-111.
- Zamudio, F., & Guerra, F. (2002). *Reproducción selectiva de especies forestales de rápido crecimiento con énfasis en el género Populus.* Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestal .

Capítulo 3.

Evaluación de siete ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) en Costa Rica y Nicaragua.

RESUMEN

Se presenta la evaluación de siete ensayos clonales de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) establecidos en Costa Rica y Nicaragua. Mediante el Software SELEGEN se calcularon los parámetros genéticos para los caracteres: DAP, volumen total, número de ramas totales, presencia de rama gruesa, calidad del tronco, presencia de bifurcación, estado fitosanitario y altura total. Los ensayos fueron divididos en dos grupos (Pacífico y Caribe) y se determinó que la agrupación Caribe presentó mejor heredabilidad media clonal y predicción en la estimación de los parámetros genéticos para todos los caracteres analizados, con excepción del volumen total y el DAP. Todos los ensayos presentaron valores altos de heredabilidad media clonal y de exactitud en la estimación de los parámetros genéticos para todos los caracteres analizados, con excepción de la presencia de rama gruesa y el número total de ramas.

La correlación genética para los siete ensayos fue baja, con $r = 0,14, 0,16, 0,22, 0,27, 0,34, 0,39$ y $0,42$ para el número de ramas totales, calidad del tronco, volumen total, presencia de rama gruesa, DAP, altura total y para el estado fitosanitario, respectivamente. Lo que refleja una alta interacción genotipo x ambiente, y por lo tanto, la necesidad de seleccionar genotipos diferentes para plantar en la región Caribe y Pacífico.

Los clones 1M y 3M se mantienen en una categoría de alto rendimiento en todos los grupos evaluados.

Se obtuvo 3,63% y 9,32% de ganancia genética para el DAP y el volumen total al seleccionar los 10 mejores clones en el ranking respecto al material testigo.

Palabras clave: *Tectona grandis*, Ensayos clonales, Interacción genotipo x ambiente.

ABSTRACT

It is presented the evaluation of seven clonal teak trials (*Tectona grandis* Linn F.) established in Costa Rica and Nicaragua. Using the SELEGEN software, the genetic parameters were calculated for the following characters: DBH, total volume, number of total branches, presence of thick branch, trunk quality, presence of bifurcation, phytosanitary status and total height. The trials were divided into two groups (Pacific and Caribbean) and it was determined that the Caribbean grouping presented better clonal mean heritability and prediction in the estimation of the genetic parameters for all the analyzed characters, with the exception of the total volume and the DBH. All the trials presented high values of clonal mean heritability and accuracy in the estimation of the genetic parameters for all the analyzed characters, with the exception of the presence of thick branch and the total number of branches.

The genetic correlation for the seven trials was low, with $r = 0.14, 0.16, 0.22, 0.27, 0.34, 0.39,$ and 0.42 for the number of total branches, trunk quality, total volume, presence of thick branch, DBH, total height and for the phytosanitary state, respectively. This reflects a high genotype x environment interaction, and therefore, the need to select different genotypes for planting in the Caribbean and Pacific region.

The 1M and 3M clones are maintained in a high performance category in all the groups evaluated.

It was obtained 3.63% and 9.32% of genetic gain for the DBH and the total volume when selecting the 10 best clones in the ranking with respect to the control material.

Key words: *Tectona grandis*, Clonal assays, Genotype x environment interaction.

INTRODUCCIÓN

La madera de *Tectona grandis* es un recurso altamente apetecido por el mercado forestal, las características físicas y estéticas la convierten en una madera valiosa y de alto valor, por este motivo, es una de las especies tropicales más plantada a nivel mundial. Esta especie ha sido cultivada en más de 50 países tanto dentro de su distribución natural como fuera de esta, además, se estima que a nivel mundial el 74% del total de plantaciones de maderas duras son de teca (Flórez, Trugilho, Lima, & Gherardi, 2014).

La existencia de una especie forestal tan importante para este sector conlleva a la creación e implementación de nuevas tecnologías que acompañen la mejora continua de este recurso (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013), de esta forma se maximiza el factor: tiempo, calidad, producción y costo, esto en busca del máximo beneficio tanto para el productor como para todos los involucrados directa o indirectamente en la actividad.

El mejoramiento clonal es un avance tecnológico de suma importancia para la teca, Pavlotzky y Murillo (2014) mencionan que la correcta evaluación de materiales genéticos superiores permite la evidencia de mejoras tanto en calidad como en producción.

El mejoramiento genético de esta especie es necesario para lograr satisfacer un mercado amplio y creciente, las plantaciones clonales permiten mayores facilidades en cuanto al manejo, pues, existe mayor homogeneidad entre árboles y además reduce el turno de cosecha (Camino & Morales, 2013).

El mejoramiento genético de la teca en Costa Rica es guiado por la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), la cual mediante recursos estatales y con la ayuda de diferentes empresas privadas ha logrado el establecimiento de ensayos clonales en diferentes partes del país para evaluar el rendimiento de los materiales genéticos en diferentes ambientes (Jiménez, 2011).

La interacción genotipo x ambiente puede generar cambios en el rendimiento de algunos clones según las condiciones en las que se encuentren, por este motivo, una evaluación eficiente de los materiales en diferentes ambientes permite obtener

el máximo beneficio para el silvicultor acorde al uso de cada clon según el ambiente presente (Zamudio & Guerra, 2002).

Por este motivo la Cooperativa GENFORES ha establecido y evaluado ensayos de teca en diferentes ambientes en busca del mejor genotipo según el área de reforestación establecida, con resultados satisfactorios que permiten afirmar la importancia del establecimiento de ensayos clonales en condiciones contrastantes (Badilla & Murillo, 2012).

La adaptación que presentan los clones en los diferentes ambientes evaluados permite definir la estabilidad de los materiales ante estas condiciones (Vega, 1990), con lo cual se determina clones especialistas para ciertos ambientes o generalistas para todos los ambientes de una región (Murillo, Wright, Monteuis, & Montenegro, 2013), con base en esta información se permite integrar o separar programas de mejoramiento genético en relación a la respuesta de los clones ante las condiciones ambientales específicas (Cornelius, Mesén, y Corea, 1994).

El objetivo de esta investigación es determinar los parámetros genéticos en caracteres según agrupaciones para siete ensayos clonales de teca en Costa Rica y Nicaragua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El área de estudio corresponde a siete ensayos clonales establecidos en Costa Rica y Nicaragua por GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal) y sus empresas miembro (figura 25, cuadro 16).

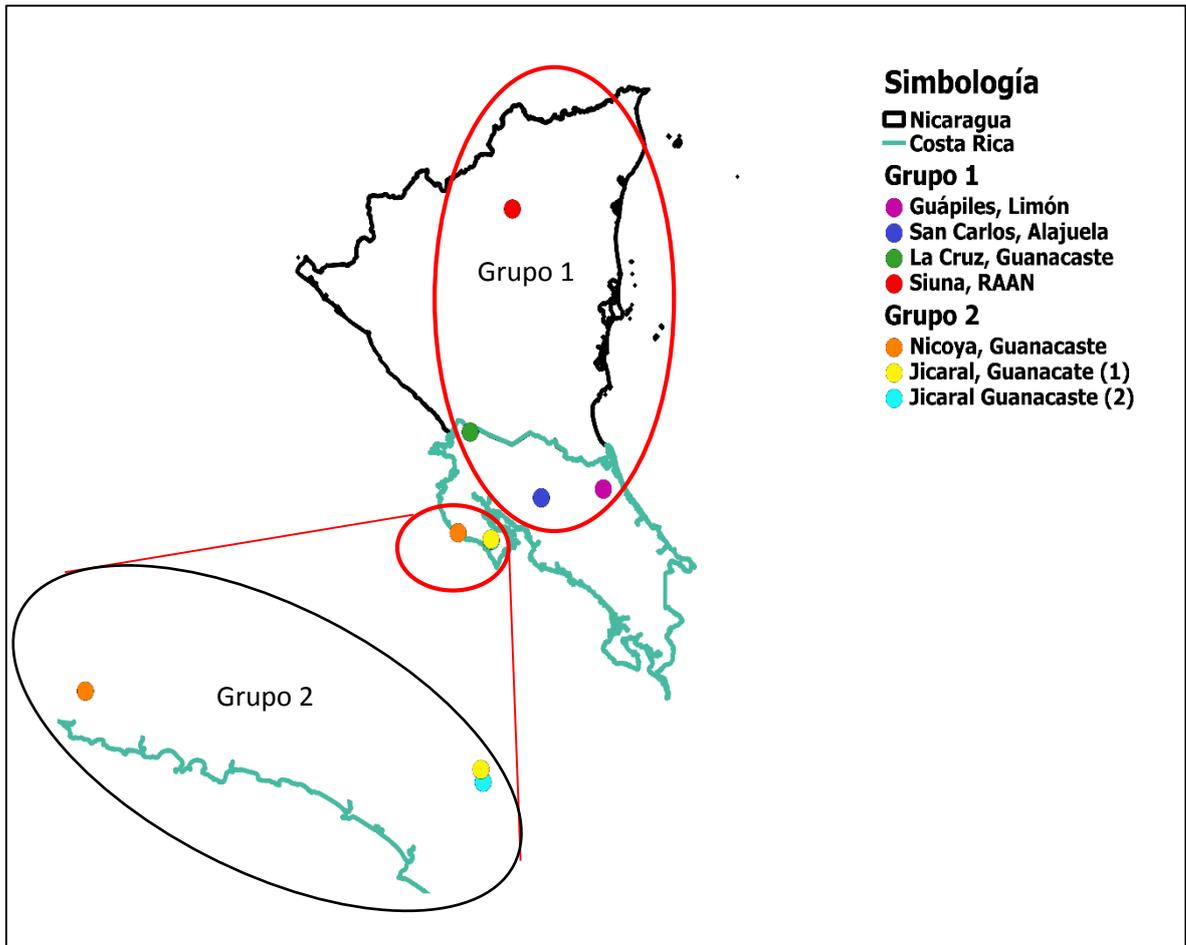


Figura 25. Localización de siete ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua.

Cuadro 16. Ubicación espacial y edad de siete ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua.

Localidad	Provincia	País	Norte	Oeste	Edad (años)
Santa Clara	Alajuela	Costa Rica	10°20'7,39"	84°32'08,28"	1,76
Aló Central	---	Nicaragua	13°37'54,39"	84°54'36,74"	1,78
Cariari	Limón	Costa Rica	10°26'04,70"	83°44'01,14"	1,96
La Garita	Guanacaste	Costa Rica	11°05'09,05"	85°27'20,90"	4,02
Jicaral (1)	Puntarenas	Costa Rica	09°51'45,12"	85°11'10,43"	1,86
Jicaral (2)	Puntarenas	Costa Rica	09°51'01,62"	85°11'01,61"	4,04
Garza	Guanacaste	Costa Rica	09°56'13,20"	85°36'44,10"	4,04

Para el análisis de los siete ensayos se formaron dos grupos, el primero para aquellos ensayos que presentan características climáticas y edáficas similares y con influencia del Caribe; el segundo, para los ensayos con características edafoclimáticas del Pacífico, posteriormente, se realizó un análisis de todos los ensayos como un conjunto.

Grupo 1 (Caribe)

El primer ensayo localizado en Santa Clara de San Carlos en Alajuela cuenta con 39 clones y un testigo, con distanciamiento de 4 m x 4 m, está localizado en la Zona Norte de Costa Rica, a 167 msnm, se encuentra en un bosque tropical húmedo, la precipitación media anual es de 3020 mm y la temperatura media anual es de 26°C (Solano y Villalobos, 2011). En este ensayo se realizó subsolado y rastra en el suelo antes de su establecimiento.

El segundo ensayo se encuentra en la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN), en la comunidad Alo, 20 Km suroeste de la ciudad de Siuna; el lugar se encuentra en la categoría de bosque húmedo tropical, la precipitación promedio para la ciudad de Siuna es de 1800 a 2200 mm anuales, presenta temperaturas mínimas de 23°C entre Diciembre y Febrero y máximas de 32°C entre Marzo hasta Abril y de Agosto hasta Septiembre (Araúz, 2005). Se aplicó 250 g/árbol de cal dolomita y 2 fertilizaciones de 18-46-0 (fosfato diamónico) con una dosis de 200 g/árbol durante el primer año, además el ensayo se estableció con una densidad de siembra de 3 m x 3 m y se evaluaron 36 clones y un testigo.

El tercer ensayo se encuentra ubicado en Cariari, Pocosí de Limón, posee una altitud promedio de 21 msnm, la zona de vida corresponde a un bosque húmedo tropical, la precipitación media anual es de 4860 mm y la temperatura media anual es de 25°C (Solano y Villalobos, 2011). Debido a la excesiva cantidad de lluvias presentes en este sitio el ensayo se encontraba con canales para la conducción de la misma, los cuales en reiteradas ocasiones se encontraban muy cerca de los árboles evaluados, lo cual podría generar errores estadísticos respecto al supuesto de homogeneidad dentro del bloque. En este ensayo se evaluó 32 clones y un testigo, dispuestos con una densidad de 4m x 5 m.

Respecto al cuarto ensayo, localizado en la Cruz de Guanacaste; se evaluó 37 clones y un testigo, se encuentra distribuido con un distanciamiento de 3,5 m x 3,5 m. Este ensayo se localiza en el Pacífico Norte de Costa Rica a 334 msnm, se encuentra en un bosque húmedo premontano con transición a basal, con una precipitación de 1684 mm y una temperatura de 26,90 °C (Ortiz, 2014).

Grupo 2 (Pacífico)

Para la segunda agrupación existen dos ensayos localizados en Jicaral de Puntarenas, los ensayos se encuentran separados por aproximadamente un kilómetro de distancia, además, difieren en cuanto a la edad y el manejo recibido.

El primero (1) cuenta con 39 clones y un testigo, los árboles se encuentran dispuestos en el campo a una distancia de siembra de 4 m x 3 m, esta plantado en un suelo vertisol y en un terreno plano.

El segundo ensayo localizado en Jicaral de Puntarenas (2) se encuentra en un terreno plano, cuenta con el primer raleo silvicultural, que consiste en la eliminación de la pareja con peor desempeño en campo, es decir un raleo del 50% de los árboles, estos árboles fueron dispuestos en campo en tresbolillo o pata de gallo, a una distancia de 3 m x 3 m. En este sitio se evaluó 39 clones y 1 testigo.

Ambos ensayos se encuentran en el Pacífico Norte de Costa Rica, a 17 msnm, la zona de vida concuerda con bosque húmedo tropical, la precipitación media anual es de 2864 mm y la temperatura media anual es de 28°C (Ortiz, 2014).

El tercer ensayo del grupo 2 se encuentra en Nicoya de Guanacaste se evaluó 36 clones y 1 testigo, presenta un distanciamiento de 3,5 m x 3,5 m, además, este ensayo cuenta con únicamente cuatro bloques. No se dio tratamiento alguno para el suelo y las condiciones de terreno son planas.

Se encuentra en el Pacífico Norte de Costa Rica a 70 msnm, la zona de vida concuerda con bosque húmedo tropical la precipitación media anual es de 2864 mm y la temperatura media anual es de 28°C (Ortiz, 2014).

Además, el ensayo recibió un raleo fitosanitario donde se eliminaron 135 árboles de los 784 que había en total, equivalente al 17,22% del ensayo.

Descripción de los materiales

El material genético a evaluar en los ensayos corresponde al aporte de cinco clones por cada empresa miembro de GENFORES. El material testigo utilizado en los ensayos es la semilla mejorada del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH), presente en todos los ensayos, con la única excepción del ensayo localizado en Nicoya de Guanacaste, debido a la mortalidad en todas las unidades experimentales de este material genético.

Previo al análisis de los ensayos se estandarizó la base de datos para utilizar únicamente el material genético que coincidía para varios sitios, se analizó 45 clones y un testigo en el grupo Caribe, 39 clones y un testigo en el grupo Pacífico y 42 clones y un testigo para los siete ensayos juntos.

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue el desarrollado por GENFORES (Murillo y Badilla, 2004a) el cual consiste en un diseño de bloques completos al azar, con seis bloques. Cada bloque cuenta con cuatro repeticiones que son distribuidas aleatoriamente en dos parejas independientes y distantes entre sí, además los ensayos se encuentran rodeados por al menos dos hileras de borde (Figura 26).

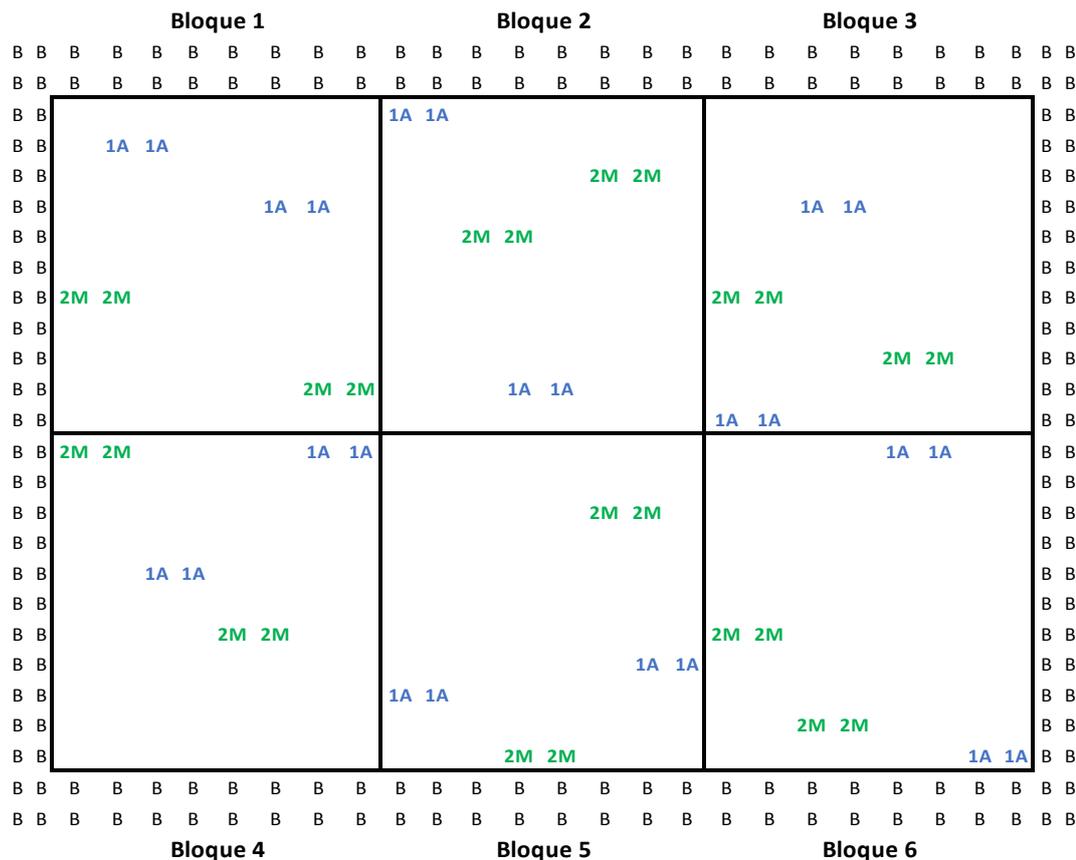


Figura 26. Diseño de un ensayo genético utilizado en GENFORES.

Se evaluaron ocho caracteres en cada ensayo, los caracteres cuantitativos evaluados fueron el DAP, la altura total, volumen total y el número de ramas totales en el fuste.

Los caracteres cualitativos evaluados fueron la presencia de bifurcación, la calidad del fuste, el estado fitosanitario y la presencia de ramas gruesas totales (cuando el diámetro de la rama es mayor a 1/3 del fuste) (Salas, 2012).

La bifurcación y la presencia de rama gruesa se anotó según su presencia o ausencia (binomial), el valor 1 ausencia del defecto y un valor de 2 que indica presencia. El estado fitosanitario se evaluó en una escala de 1 a 3; valor 1 para aquellos árboles sin problemas fitosanitarios; valor 2 para aquellos que presentaron problemas leves o no significativos para el desarrollo del árbol; y valor 3 para aquellos individuos que presentaron evidencias de problemas fitosanitarios graves que podrían causar un efecto en la sobrevivencia o el desarrollo normal (Arguedas, Rodríguez, & Guevara, 2015).

Respecto a la calidad del tronco, esta se estimó por trozas (2,5 metros de largo), hasta un máximo de cuatro, con valores de 1 a 4, siendo 1 el valor más alto y representa trozas sin ningún defecto, valor 2: para los árboles que presentaran defectos leves, valor 3 para aquellas que presentan limitaciones para el aserrío y valor 4 para las trozas que no pueden ser utilizadas para el aserrío comercial.

Análisis de datos:

Para calcular la calidad de los árboles se utilizó la metodología de Murillo y Badilla (2004b) (Cuadro 17):

Cuadro 17. Estimación de la calidad del árbol (Murillo y Badilla, 2004b).

Cantidad de trozas	Primera troza	Segunda troza	Tercera troza	Cuarta troza
1	1,00			
2	0,60	0,40		
3	0,45	0,33	0,22	
4	0,40	0,30	0,20	0,10

En la ecuación 1 se demuestra la utilización de la fórmula para un árbol con cuatro trozas:

$$Calidad = T1 * 0,40 + T2 * 0,30 + T3 * 0,20 + T4 * 0,10 \quad (1)$$

Donde:

T1, T2, T3 y T4 son calidades asignadas a cada troza (de 1 a 4)

Troza calidad 1: sin defectos

Troza calidad 2: con defectos leves

Troza calidad 3: con limitaciones para su utilización con aserrío (solo es aprovechable un 50% de la troza en aserrío).

Troza calidad 4: son aquellas trozas con características no aptas para el aserrío.

Para efectos de facilidad en la interpretación de los datos se calcula la calidad porcentual mediante la fórmula 2:

$$Calidad (\%) = 100 * \left(1 - \frac{calidad-1}{3}\right) \quad (2)$$

Según Darwin (2013) y Tamarit y otros (2013) la teca presenta factores de forma de 0,55 y 0,43; respectivamente, para efectos del cálculo del volumen total en el presente estudio se utilizó un factor de forma de 0,5 y se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_{total} = 0,7854 * \left(\frac{dap}{100}\right)^2 * h_{total} * 0,5 \quad (3)$$

Para determinar la interacción genotipo-ensayo se utilizó el software SELEGEN REML/BLUP, con el modelo 3: (bloques Completos al azar, clones no emparentados, varias plantas por parcela, varias localidades) (Resende, Software SELEGEN-REML/BLUP, 2002), cuyo modelo es: $y = Xr + Zg + Wp + Ti + e$, donde “y” es el vector de datos de la variable dependiente, “r” el vector de efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” el vector de los efectos de la parcela (asumidos como aleatorios), “i” es el vector de los efectos de la interacción genotipo X ambiente (aleatorios), y “e” el vector del error residual (aleatorios).

Se determinó la ganancia genética en volumen total de los 10 mejores clones en el ranking respecto al promedio de los ensayos y respecto al testigo evaluado; esto para cada grupo por separado y para todos los ensayos juntos.

Además, se determinó la ganancia obtenida en DAP mediante el uso de los 10 mejores clones respecto al promedio del ensayo y del testigo.

Respecto a la ganancia genética en el DAP, al multiplicar el porcentaje de ganancia por los años de un turno de rotación base se obtiene el tiempo de disminución en años para el turno de rotación, obteniendo el mismo diámetro pero a una edad más corta.

El análisis en las posiciones del ranking, de acuerdo a su valor genético, se puede dividir en tres zonas; alto, medio y bajo rendimiento, según esta categorización se puede evidenciar interacciones simples y complejas. Interacción simple para aquellos genotipos que se mueven un rango de categoría e interacción compleja para los que se mueven dos rangos.

RESULTADOS

Grupo 1 (Caribe)

El Software SELEGEN REML/BLUP permite la determinación de la certeza o confiabilidad de los parámetros obtenidos mediante el término exactitud de estimación. Valores superiores a un 60% pueden considerarse como altamente confiables (O. Murillo, comunicación personal, 27 de Noviembre, 2017), por lo tanto este estudio omite aquellos caracteres que no alcanzaron este valor de precisión.

El único carácter analizado cuyo valor fue menor al mínimo aceptable fue la bifurcación con un valor de 0,13; además, el volumen comercial obtuvo el valor de exactitud de 0,47 pero dada la relevancia de este carácter en el análisis se decidió presentarlo.

El cuadro 18 permite observar que el valor más alto de heredabilidad media del clon lo obtiene la altura total con 0,55; esto indica que la selección genética mediante características como altura permite capturar el componente de heredabilidad en una proporción media.

Para el volumen total se observa que el coeficiente de variación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente presenta el valor más alto, lo cual está relacionado a la correlación genética tan baja que presenta este carácter, ambos parámetros afirman la gran diferencia que presentan los genotipos en los ensayos.

Ganancia Genética

La ganancia genética en volumen total es de 4,26% con el uso de los 10 mejores clones en el ranking respecto al material testigo y mismo valor se obtiene si se compara con el promedio del ensayo. Se obtiene una ganancia genética de 2,76% para el DAP con lo cual para un turno de rotación de 18 años se permite acortar el tiempo de cosecha final 0,5 años.

Cuadro 18. Parámetros genéticos para 4 ensayos clonales de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica y Nicaragua (agrupación caribe).

Parámetro	DAP	Estado fitosanitario	N rama	Rama gruesa	calidad	Voltotal	h total
Vg	0,07	0,00	0,34	0,00	1,08	0,00	0,05
Vparc	0,17	0,00	0,97	0,00	1,05	0,00	0,13
Vint	0,18	0,00	0,63	0,00	1,89	0,00	0,07
Ve	2,48	0,08	12,52	0,04	103,36	0,00	1,45
Vf	2,90	0,09	14,45	0,04	107,38	0,00	1,70
h ² g	0,02± 0,01	0,00± 0,00	0,02± 0,01	0,01± 0,00	0,01± 0,01	0,01± 0,00	0,03± 0,01
c ² int	0,06	0,00	0,04	0,01	0,02	0,09	0,04
h ² mc	0,44	0,31	0,50	0,37	0,35	0,22	0,55
Acclon	0,67	0,56	0,71	0,60	0,59	0,47	0,74
Rgloc	0,27	0,56	0,35	0,44	0,36	0,11	0,40
SEP	0,19	0,02	0,41	0,01	0,84	0,00	0,15
CVgi%	3,15	1,57	7,98	1,59	1,11	5,81	3,09
CVe%	9,88	10,63	25,51	9,05	4,97	27,03	9,02
Media general	8,24	1,31	7,31	1,05	93,85	0,024	7,20

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve = Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP = Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

En la figura 27 se observa que los materiales no son significativamente diferentes entre ellos, esta afirmación se hace mediante en el criterio de traslape de los límites de confianza.

Grupo 2 (Pacífico)

Mejores valores de correlación, exactitud, así como heredabilidad media clonal para el volumen total son esperados en el grupo 2 debido a que los tres ensayos se encuentran en una zona con características ambientales muy semejantes, debido a la cercanía entre ellos, contrario al análisis en el grupo 1.

Valores de exactitud de 0,22, 0,16, 0,20 y 0,40 son obtenidos para los caracteres estado fitosanitario, número de ramas, bifurcación y calidad, por lo tanto no cumplen con el mínimo aceptable para ser tomadas en consideración (cuadro 19).

Nuevamente el coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente toma el valor más alto en el volumen total, a pesar de observarse un aumento en la heredabilidad media y en el valor exactitud se logra ver una correlación genética baja, que indica grandes diferencias para los genotipos según el sitio en el que se encuentran.

Cuadro 19. Parámetros genéticos para 3 ensayos clonales de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica (agrupación pacífico).

Parámetro	DAP	Rama gruesa	Voltotal	h total
Vg	0,11	0,00	0,00	0,06
Vparc	0,35	0,00	0,00	0,21
Vint	0,25	0,00	0,00	0,18
Ve	2,74	0,05	0,00	2,33
Vf	3,46	0,05	0,00	2,78
h²g	0,03±0,01	0,01±0,00	0,03±0,01	0,02±0,01
c²int	0,07	0,01	0,10	0,07
h²mc	0,44	0,26	0,38	0,38
Acclon	0,66	0,51	0,62	0,61
Rgloc	0,31	0,33	0,25	0,26
SEP	0,25	0,02	0,00	0,20
CVgi%	2,84	1,72	8,27	2,38
CVe%	8,06	10,13	25,63	7,35
Media general	11,44	1,05	0,098	10,49

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve= Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP= Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

Mediante uso del criterio de traslape en los límites de confianza se presenta en la figura 28 que no existen diferencias estadísticas para ninguno de los materiales evaluados en los tres ensayos en conjunto.

Ganancia genética

La ganancia genética obtenida en el volumen total para los mejores diez clones en el ranking es de 7,26% y 6,80% respecto al promedio del ensayo y los testigos respectivamente; en este caso, el valor de comparación con el testigo tiende a ser

menor que el valor en contraste al ensayo debido a que el testigo ocupó una posición alta en el ranking (sétimo lugar para 43 materiales evaluados).

El DAP obtiene una ganancia genética de 2,45% si se compara respecto a los testigos; esto implica una reducción en la espera del turno de cosecha final de 0,44 años, tomando en consideración 18 años como turno base de cosecha.

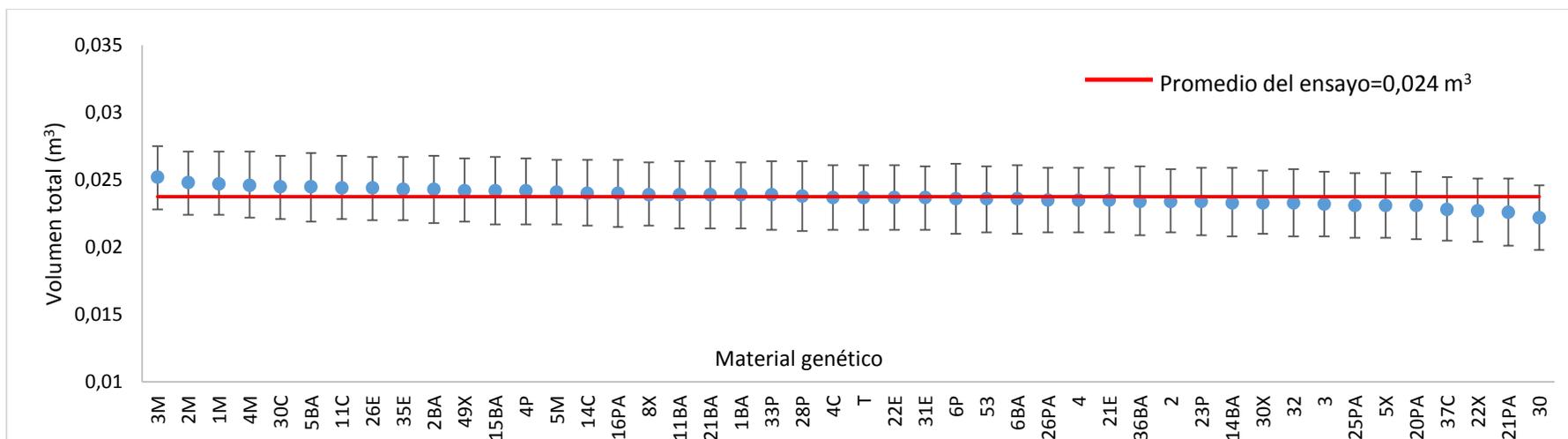


Figura 27. Ranking genético para el volumen total (m³) en 4 ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua (agrupación caribe).

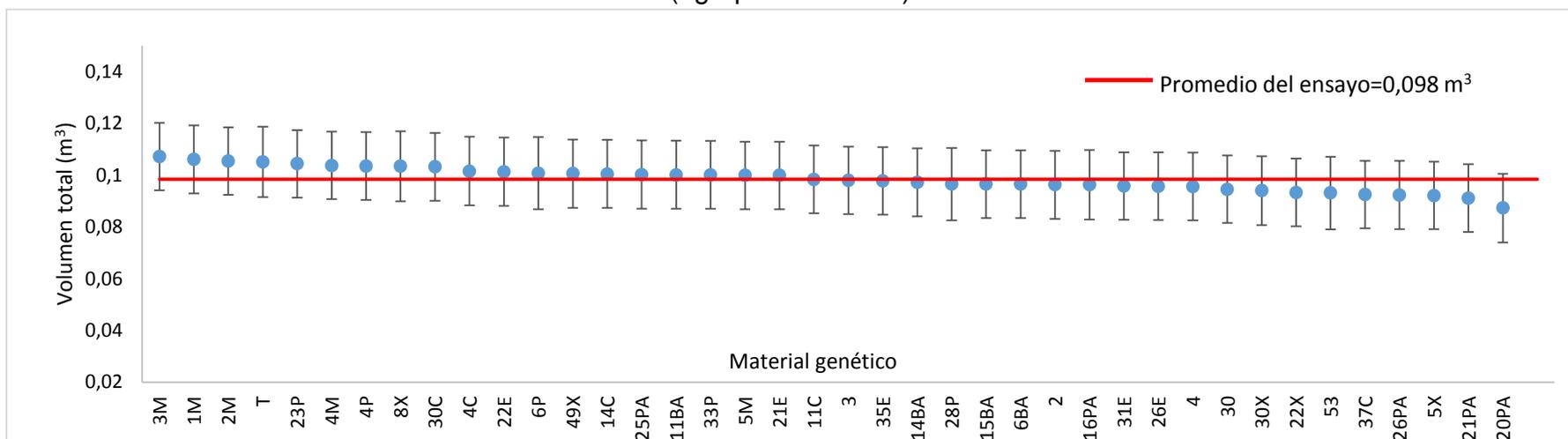


Figura 28. Ranking genético para el volumen total (m³) en 3 ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica (agrupación pacífico)

Grupo 1 y 2 (Caribe y Pacífico)

Para la evaluación de todos los ensayos, la presencia de bifurcación fue el único carácter que no cumplió con el mínimo aceptable de exactitud, con un valor de 0,14.

Los valores de heredabilidad media clonal y exactitud en la predicción de los parámetros genéticos son mayores en el análisis en conjunto para todos los ensayos en comparación al análisis por subgrupos (cuadro 20). Respecto al número de ramas totales y presencia de rama gruesa se observa mejores valores en el grupo 1.

El valor promedio para el estado fitosanitario (1,21) muestra que en general los árboles en los ensayos clonales presentan pocas enfermedades o daños. La leve presencia de ramas gruesas en los árboles se evidencia en el valor promedio presentado en el cuadro 20. La calidad es otro indicador muy importante, su valor promedio (93,90%) indica que, en forma general, los árboles presentan buena forma.

A pesar de observarse un aumento en las heredabilidades media y en los valores de precisión, la correlación genética para estos caracteres entre los ensayos evaluados es muy baja. Un valor de correlación genético bajo indica que existe una alta interacción genotipo-ambiente, por lo tanto se presenta una baja adaptabilidad de los clones en las condiciones ambientales evaluadas.

Por otra parte el valor de $CV_e\%$ indica la alta influencia ambiental en todos los caracteres analizados, su valor es mucho mayor al presentado en el parámetro $CV_{gi}\%$, el cual indica el peso de los valores genéticos en la estimación de los demás parámetros.

Cuadro 20. Parámetros genéticos para siete ensayos clonales de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica y Nicaragua.

Parámetro	DAP	Estado fitosanitario	N rama	Rama gruesa	calidad	Voltotal	h total
Vg	0,10	0,00	0,12	0,00	0,76	0,00	0,07
Vparc	0,21	0,00	0,99	0,00	2,08	0,00	0,17
Vint	0,19	0,00	0,74	0,00	4,06	0,00	0,10
Ve	2,63	0,06	11,81	0,04	96,83	0,00	1,76
Vf	3,13	0,07	13,66	0,05	103,72	0,00	2,10
h ² g	0,03± 0,01	0,00± 0,00	0,01± 0,00	0,00± 0,00	0,01± 0,00	0,03± 0,01	0,03± 0,01
c ² int	0,06	0,01	0,05	0,01	0,04	0,11	0,05
h ² mc	0,67	0,46	0,38	0,34	0,37	0,56	0,70
Acclon	0,82	0,68	0,62	0,58	0,61	0,75	0,84
Rgloc	0,34	0,42	0,14	0,27	0,16	0,22	0,39
SEP	0,18	0,01	0,27	0,01	0,69	0,00	0,14
CVgi%	3,31	1,55	4,54	1,11	0,93	8,82	3,01
CVe%	8,46	9,47	22,53	8,68	4,55	24,57	7,99
Media general	9,51	1,21	7,63	1,05	93,90	0,05	8,50

Vg = Varianza genotípica; Vparc = Varianza ambiental entre parcelas; Vint = Varianza de la interacción genotipo x ambiente; Ve = Varianza residual; Vf = Varianza fenotípica total; h²g = Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genéticos totales; c²int = Coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; h²mc = Heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo sobrevivencia completa; Acclon = Exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; Rgloc = Correlación genotípica entre el desempeño de varios ambientes; SEP = Desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; CVgi% = Coeficiente de variación genotípica; CVe% = Coeficiente de variación residual; Media general = Estimado de la media poblacional.

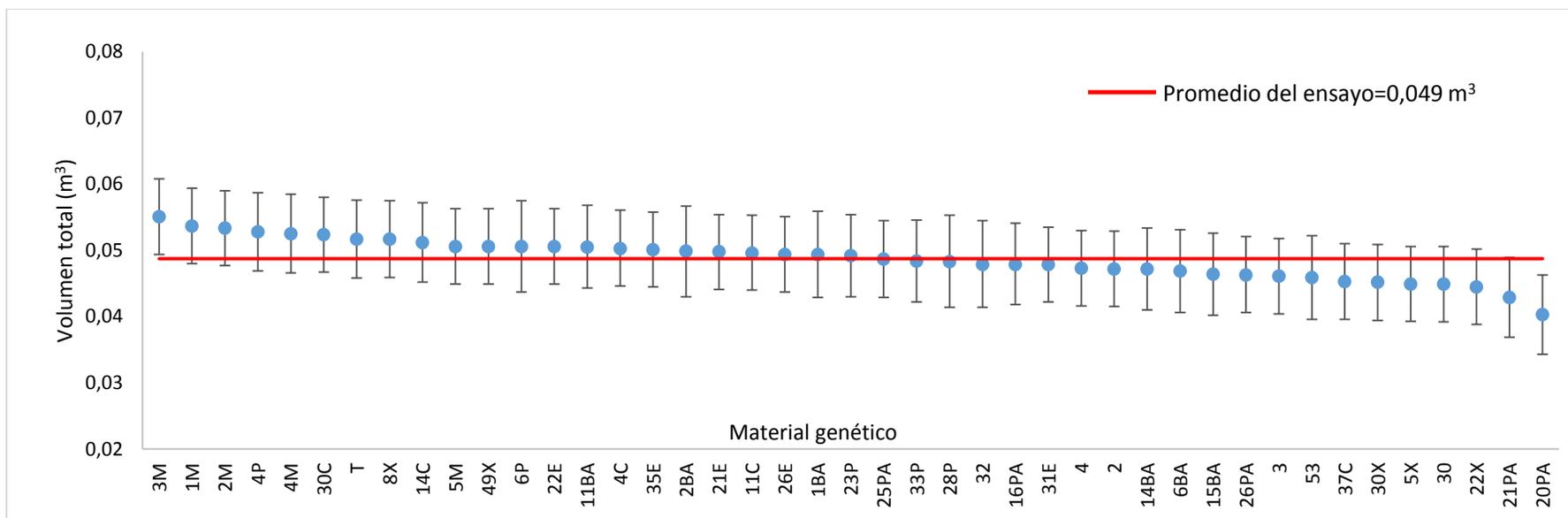
Ganancia genética

Respecto a la ganancia genética en el volumen total para los 10 mejores clones en el ranking se obtienen valores de 9,89% y 9,32% en contraste al promedio del ensayo y los testigos respectivamente, estos valores tan semejantes se deben a que el testigo evaluado tomó una posición alta en el ranking.

Respecto a la ganancia genética en el DAP, se obtuvo valores de 3,70% y 3,63% en contraste al promedio del ensayo y los testigos respectivamente; tomando en consideración un turno de cosecha de 18 años se permite acortar este periodo 0,65 años si se utilizan los 10 mejores clones en el ranking, respecto al material testigo.

El clon 3M es estadísticamente superior a los clones 21PA y 20PA, las primeras seis posiciones el ranking son significativamente diferentes al último clon en el ranking (20PA), pero ningún material es estadísticamente superior al testigo, este último logró la posición 7 de ranking para 43 materiales evaluados (Figura 29).

Figura 29. Ranking genético para el volumen total (m³) en siete ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua.



Al realizar el análisis del ranking del valor genético dividiéndolo en tercios se encuentra que dos clones se posicionan en la primeras posiciones, indicados en verde los de alto rendimiento, en celeste se encuentran los materiales de medio rendimiento, donde el testigo alcanzó esta categoría (figura 30).

El testigo presenta un bajo rendimiento para el grupo Caribe, pero sube a la categoría de alto rendimiento en el grupo Pacífico y se mantiene en la posición de mediano rendimiento para la evaluación general. El testigo proviene de la zona Pacífico de Costa Rica, parece que su rendimiento en zona Caribe disminuye, es decir, conserva su alto potencial de expresión genética en zonas Pacíficas, inclusive el buen rendimiento en el grupo Pacífico le permitió mantenerse en la categoría de mediano rendimiento para la evaluación en conjunto con los siete ensayos.

A pesar de las pocas diferencias significativas entre los materiales evaluados se observa una tendencia en los clones con letra M de mantenerse en las primeras posiciones del ranking.

Grupo 1 (Caribe)		Grupo 2 (Pacífico)		Todos	
Orden	Genotipo	Orden	Genotipo	Orden	Genotipo
1	3M	1	3M	1	3M
2	2M	2	1M	2	1M
3	1M	3	2M	3	2M
4	4M	4	T	4	4P
5	30C	5	23P	5	4M
6	5BA	6	4M	6	30C
7	11C	7	4P	7	T
8	26E	8	8X	8	8X
9	35E	9	30C	9	14C
10	2BA	10	4C	10	5M
11	49X	11	22E	11	49X
12	15BA	12	6P	12	6P
13	4P	13	49X	13	22E
14	5M	14	14C	14	11BA
15	14C	15	25PA	15	4C
16	16PA	16	11BA	16	35E
17	8X	17	33P	17	2BA
18	11BA	18	5M	18	21E
19	21BA	19	21E	19	11C
20	1BA	20	11C	20	26E
21	33P	21	3	21	1BA
22	28P	22	35E	22	23P
23	4C	23	14BA	23	25PA
24	T	24	28P	24	33P
25	22E	25	15BA	25	28P
26	31E	26	6BA	26	32
27	6P	27	2	27	16PA
28	53	28	16PA	28	31E
29	6BA	29	31E	29	4
30	26PA	30	26E	30	2
31	4	31	4	31	14BA
32	21E	32	30	32	6BA
33	36BA	33	30X	33	15BA
34	2	34	22X	34	26PA
35	23P	35	53	35	3
36	14BA	36	37C	36	53
37	30X	37	26PA	37	37C
38	32	38	5X	38	30X
39	3	39	21PA	39	5X
40	25PA	40	20PA	40	30
41	5X			41	22X
42	20PA			42	21PA
43	37C			43	20PA
44	22X				
45	21PA				
46	30				

Figura 30. Ranking genético, para el volumen total presentando en tercios según su valor genético para siete ensayos clonales de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua.

DISCUSIÓN

En general, las subagrupaciones de los ensayos presentan valores en los parámetros genéticos más bajos respecto a su evaluación en conjunto, la figura 30 indica que los mejores genotipos coinciden entre las subagrupaciones y por lo tanto esta tendencia de aumento en los valores de los parámetros genéticos está referida a un aumento en el número de observaciones, lo cual permite un mejor estimador genético debido a la reducción de la varianza ambiental (Zamudio & Guerra, 2002).

Tres ensayos tienen una edad cercana a los cuatro años y para los restantes las edades rondan los dos años. En relación a los ensayos más jóvenes Ávila (2013) indica que el genotipo no expresa algunos de sus rasgos por consecuencia de la interacción genotipo x ambiente a tempranas edades.

Por otra parte, la evaluación individual de cada ensayo no arroja una tendencia clara de menores valores en los parámetros genéticos debido al factor edad. A pesar que la evaluación individual presenta mejorías en valores para algunos ensayos no se indica algún dato excepcional que posicione algún ensayo por encima de otros (Anexo 1).

En un análisis individual de los tres ensayos con edades cercanas a los 4 años, el ensayo de Jicaral presenta valores en los parámetros genéticos un poco más bajos para el diámetro, a pesar que este ensayo contaba con el raleo silvicultural de 50% recomendado por GENFORES. La tendencia es una mejoría en los parámetros genéticos del ensayo una vez aplicado el primer raleo silvicultural (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994), lo cual no se evidencia en este caso.

El ensayo localizado en Nicoya de Guanacaste, a pesar de haber tenido un raleo fitosanitario que no va acorde a los lineamientos de manejo recomendados por GENFORES, presentó en forma individual una leve mejoría en valores de heredabilidad así como de exactitud en los parámetros genéticos del DAP al comparar con el ensayo de Jicaral de 4,04 años.

Respecto al número de ramas y presencia de rama gruesa, el análisis en conjunto bajó la heredabilidad media clonal y los valores de exactitud en las estimaciones de

los parámetros genéticos lo cual indica que el bajo factor genético en el grupo 2 afectó los resultados generales. Por otra parte las heredabilidades con valores bajos están condicionadas por el bajo valor de correlación genética, dado que las características evaluadas están fuertemente influenciadas por el entorno (Gómez, 2012).

El análisis en conjunto para los siete ensayos clonales permite obtener resultados que posicionan los clones 3M y 1M en las primeras posiciones en el ranking pero sin diferencias significativas respecto a el material testigo (T), por otra parte, es importante señalar que la correlación genética entre sitios para la el volumen total es muy baja con únicamente 22%. Este resultado indica que el ranking en los diferentes ensayos varía en gran proporción, es una tendencia que se espera cuando se analizan ensayos en ambientes contrastantes, tal como lo indican DaMatta (2007) y Ávila (2013).

El testigo proveniente del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (T) presenta una buena posición en el ranking, para el grupo Pacífico, este se cataloga como un material de alto rendimiento, para la evaluación general se posiciona como el número 7 en un total de 43 materiales evaluados, esto demuestra la calidad de la semilla mejorada genéticamente que posee el Centro Agrícola Cantonal de Hojancha, así como lo mencionan Badilla y Murillo (2012) y Leandro, Garzón, y Murillo (2003).

Una correlación genética baja para los ensayos evaluados representa que es importante la evaluación de los clones en diferentes ambientes, debido a que los mejores genotipos no siempre se comportan de la mejor forma en otros ambientes, tal como demuestran los resultados presentados por: Salaya, López, y Vargas (2012); Ávila, Murillo, Murillo, y Sandoval (2015) y Murillo (2001).

Cuando dos o más ensayos indican una correlación genética baja se deducen dos conclusiones claves; los genotipos superiores no son iguales entre localidades y la empresa debe tener más de un programa genético para obtener el mejor beneficio

en cada sitio de desarrollo de la especie (O. Murillo, comunicación personal, 9 de octubre, 2017).

Se observa en el cuadro 20 que la correlación genética en el estado fitosanitario presentó el valor más alto con 42% de similitud, indica que el estado de salud de los genotipos presenta intermedia repetitividad de la misma en siete ambientes diferentes. De forma similar la altura presentó el valor de 39% para la correlación entre sitios seguido por el DAP con 34%, además, la presencia de rama gruesa presentó el valor de 27% para este parámetro, lo cual corresponde a valores bajos de similitud en genotipos en cuanto a la correlación entre sitios. Además, valores bajos también se encontraron para este parámetro en el número de ramas, la calidad y el volumen total con 14%, 16% y 22% respectivamente.

En cuanto a la heredabilidad individual se encontraron valores bajos para DAP, la altura total y el volumen total con 3% para los tres caracteres; heredabilidades individuales de 12% y 12,50%, para el DAP y el volumen comercial para la teca son obtenidas mediante el análisis de 15 genotipos establecidos en un ensayo clonal en Sabah, localizado al este de Malasia (Goh, Japarudin, Lapammu, Flori, & Monteuis, 2013), lo cual respalda el hecho de la baja heredabilidad individual para los 7 ensayos en estas variables.

Badilla y Murillo (2012) presentaron valores de heredabilidad media clonal para tres ensayos de teca en Costa Rica a los 2,4 años de edad: 27%, 57%, y 23% para el volumen comercial, calidad y presencia de rama gruesa, respectivamente; en contraste al presente estudio se obtuvo valores de 56% para el volumen total y 37% para la calidad, por lo tanto, se evidencia un valor más alto en la variable volumen pero al mismo tiempo inferior para la calidad, aunque Pérez (2016) presenta el valor de 62,80% de heredabilidad media clonal para el volumen comercial, lo cual podría indicar que este estudio se encuentra en un rango aceptable para esta variable. En cuanto a la presencia de rama gruesa, se presentó el valor de heredabilidad media clonal de 34% demostrando gran similitud en comparación al estudio de Badilla y Murillo (2012).

La heredabilidad media clonal para el diámetro fue de 67% y de 38% para el número de ramas, Pérez (2016) presentó valores de heredabilidad media clonal para un ensayo clonal de teca ubicado en el Pacífico Sur de Costa Rica a los 5,4 años de edad, de 84,80% para el DAP; valor relativamente más alto respecto al obtenido en este estudio, en referencia al número de ramas se observa un valor de heredabilidad bajo para este carácter en los genotipos evaluados.

En cuanto al estado fitosanitario se encontró una heredabilidad media clonal de un 46%, y un valor promedio de 1,21; para una escala que evalúa de 1 a 3, es decir, en forma general los ensayos se encuentran en buenas condiciones fitosanitarias, este valor corresponde a la resistencia ante enfermedades que presentan los clones y el material testigo con semilla mejorada que se evaluó en los ensayos, así lo demuestran Arguedas, Murillo, Ayuso, y Madrigal (2005), quienes encontraron diferencias altamente significativas de los clones de teca ante la resistencia a la roya (*Olivea tectonae* Rac.), más de un 90% de los clones evaluados presentaron una resistencia alta ante el ataque de este hongo.

La calidad promedio para los siete ensayos evaluados es alta en comparación con los resultados obtenidos por Pérez (2016); es importante mencionar que una tendencia de alta calidad es un resultado atribuible en gran medida al uso de clones que han sido evaluados en ensayos genéticos (Murillo, Wright, Monteuis y Montenegro, 2013).

Respecto a la ganancia genética en el volumen total para los 10 mejores clones en el ranking se obtienen valores de 9,89% y 9,32% en contraste al promedio del ensayo y los testigos respectivamente, estos valores tan semejantes son debidos a que el testigo evaluado tomó una posición alta en el ranking. La ganancia genética en el DAP permite reducir el turno de cosecha 0,65 años, valor similar al encontrado por Pérez (2016) en un ensayo de teca en Darién de Panamá con una reducción de 0,8 años.

Normalmente se espera una mayor reducción en el turno de cosecha cuando se evalúa mayor cantidad de materiales, pues al aumentar la intensidad de selección

en las evaluaciones también crece la probabilidad de encontrar genotipos altamente superiores (Balcorta & Vargas, 2004). En este informe la cantidad de materiales evaluados fue reducida para analizar únicamente aquellos que coinciden entre de sitios para presentar resultados representativos de la mayor cantidad de sitios, por lo tanto valores bajos de ganancias pueden ser explicados por la disminución en la heterogeneidad de los materiales evaluados.

Por otra parte el bajo valor de correlación genética entre sitios influyó en los estimados de ganancia genética, debido a la alta interacción genotipo-ambiente los valores genéticos de los materiales se vieron afectados pues su crecimiento se ve alterado por las condiciones ambientales donde se presentan, así lo indicó Murillo (2001), el cual encontró que agrupaciones entre ensayos genéticos que presentaron baja interacción genotipo x ambiente lograron aumentar las ganancias genéticas.

Valores más altos en ganancia genética, así como una disminución mayor en el turno de cosecha son reflejo de una buena selección de los materiales a evaluar, los cuales permiten obtener resultados satisfactorios, tal como lo menciona Murillo (1992), el cual indica a partir de una amplia y correcta evaluación y selección de árboles plus las ganancias esperadas aumentan considerablemente.

Por otra parte, ganancias genéticas bajas indican que no existe un material altamente superior, los valores genéticos atribuidos a cada uno de estos representan la homogeneidad en rendimiento volumétrico para los materiales evaluados, así lo mencionan Badilla y Murillo (2012) quienes afirman que altos valores de heredabilidad pueden ser atribuidos a diferencias genéticas de gran magnitud.

En un ensayo clonal de teca al sur de Sumatra, en Indonesia se evaluaron 35 clones a la edad de 5,5 años, en cuyo estudio se obtuvo resultados de 2,80% y 10,65% de ganancia genética para el DAP y el volumen total respectivamente (Muslimin, Sofyan, & Islam, 2013), los cuales son resultados muy cercanos a los presentados en este informe, pero se espera que los parámetros genéticos logren un alza

conforme se realizan los primeros raleos silviculturales (Cornelius, Mesén, & Corea, 1994).

Goh et al (2013) presentan valores de ganancia genética para la teca de hasta 10,4% y 15,7% para el DAP y el volumen total respectivamente, para 3 de los mejores clones evaluados en un total de 15; este estudio muestra valores para un ensayo de 3 años de edad y el rendimiento de los genotipos podría estar influenciado por el factor edad, por este motivo tanto Pérez (2016) como Molina, Gutierrez, e Ipinza (2001) recomiendan una edad de cinco años como la ideal para realizar la selección genotípica, por lo tanto, es necesario continuar evaluando estos ensayos para determinar si la ganancia genética aumenta conforme lo hace la edad de los ensayos hasta un periodo de estabilización.

En ensayos de progenie de *Acacia mangium* en Córdoba de Colombia, evaluados a un año de edad se encontró valores del coeficiente de estimación del peso de los efectos de la interacción genotipo x ambiente (C^2_{int}) para la altura total de 0,03 en 3 ensayos genéticos y hasta de 0,05 para una combinación de dos de estos ensayos (Pastrana, Espítia, & Murillo, 2012). Este parámetro genético se puede utilizar como un indicador de efecto ambiental; en el presente estudio se encuentran valores de 0,06 y hasta 0,11 para el DAP y el volumen total respectivamente, bastante altos al compararlos con el estudio de Pastrana, Espítia, y Murillo (2012), aún tomando en consideración que a una corta edad de selección se espera afectaciones en el desarrollo y la expresión del genotipo, por lo tanto, a edades tempranas se esperan valores con alta variación ambiental (Ávila, Murillo, Murillo, & Sandoval, 2015). Por otra parte, para una evaluación de siete ensayos genéticos y evaluados en sitios tan contrastantes se esperan altas variaciones ambientales entre ellos tal como se demuestra en los parámetros de variación ambiental presentados en el cuadro 20.

CONCLUSIONES

La agrupación de los ensayos Caribeños presentó mayores valores de heredabilidad media clonal y de exactitud en la predicción de los parámetros genéticos respecto a la agrupación Pacífico, excepto en el volumen total y el DAP.

Un análisis en conjunto para los dos grupos de ensayos aumenta los valores de heredabilidad media clonal y de exactitud para todos los caracteres analizados con excepción del número de ramas y la presencia de ramas gruesas.

Ningún clon es estadísticamente diferente al material testigo. El clon 3M es estadísticamente superior a los clones 21PA y 20PA, las primeras seis posiciones del ranking son significativamente diferentes al último clon en el ranking (20PA).

El testigo logró posicionarse como el séptimo material en el ranking para 43 genotipos evaluados.

Se identifican dos genotipos de alto rendimiento: 3M y 1M.

Existe una tendencia de mejor rendimiento para clones con la letra M, indicados como el material de una empresa.

La ganancia genética en el volumen total para los 10 mejores clones en el ranking general es de 9,32% en comparación al testigo evaluado.

La ganancia genética en el DAP es de 3,63% en relación al testigo; tomando en consideración un turno de cosecha de 18 años se permite acortar este periodo 0,65 años si se utilizan los 10 mejores clones en el ranking.

Las pocas ganancias genéticas se atribuyen a la gran similitud en valores genéticos para los materiales evaluados.

Los bajos valores en los parámetros genéticos están condicionados a una alta interacción genotipo-ambiente.

La correlación genética fue baja para todos los caracteres en los siete ensayos clonales indicando una alta interacción genotipo x ambiente y por lo tanto una baja adaptabilidad de los materiales a las condiciones ambientales evaluadas.

REFERENCIAS

- Araúz, J. (2005). *Evaluación de daños post-aprovechamiento mejorado del Bosque Tropical Húmedo, en la finca Susun, comunidad de San Martín, Siuna, RAAN, Nicaragua*. Universidad Nacional Agraria , Managua .
- Arguedas, M., Murillo, O., Ayuso, F., & Madrigal, O. (2005). Variación en la resistencia de clones de teca (*Tectona grandis* L.f.) ante la infección de la roya (*Olivea tectonae* Rac.) en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(2), 15-24.
- Arguedas, M., Rodríguez, M., & Guevara, M. (2015). Plagas y enfermedades en plantaciones de teca en Centroamérica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Guayaquil, Ecuador.
- Ávila, C. (2013). *Selección temprana de clones de Gmelina arborea Roxb. con base en su comportamiento fisiológico en vivero vrs plantación, en el Pacífico Sur de Costa Rica*. Tesis de maestría, Cartago.
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O., & Sandoval, C. (Julio de 2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana: Kurú*, 12(29), 2-14.
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2012). *Evaluación del comportamiento de clones de teca (Tectona grandis) en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Balcorta, H., & Vargas, J. (2004). Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 13-19.
- Camino, R., & Morales, J. P. (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*. Turrialba: CATIE.
- Cornelius, J., Mesén, J., & Corea, E. (1994). *Manual sobre mejoramiento genético forestal: con referencia especial en América Latina* . Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza .
- DaMatta, F. (2007). Ecophysiology of tropical tree crops: an introduction. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 419-446.
- Darwin, A. (2013). *Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) para dos especies, teca (Tectona grandis) y melina (Gmelina arborea) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac CA. en la provincia de los ríos*. Tesis de pregrado, Escuela Superior Plotécnica de Chimborazo, Riobamba.

- Resende, d. M. (2002). Software SELEGEN-REML/BLUP. 1. Colombo, Paraná, Brasil: Embrapa Florestas.
- Flórez, J., Trugilho, P., Lima, J., & Gherardi, M. d. (Marzo de 2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y Bosques*, 20(1), 1-2.
- Goh, D., Japarudin, Y., Lapammu, M., Flori, A., & Monteuis, O. (2013). Growth differences and genetic parameter estimates of 15 teak (*Tectona grandis* L.f.) genotypes of various ages clonally propagated by microcuttings and planted under humid tropical conditions. *Silvae Genetica*, 62(4-5), 196-206.
- Gómez, N. (2012). Estimación de heredabilidad y correlaciones genéticas en caracteres morfológicos y fisiológicos para una población de la cycada *Zamia obliqua*. Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia.
- Jiménez, M. (2011). *Un modelo de integración de la extensión, la docencia y la investigación en el marco de una universidad tecnológica. El caso del proyecto GENFORES*. Santa Fé .
- Leandro, L., Garzón, D., & Murillo, O. (26-28 de Noviembre de 2003). Potencial de mejoramiento genético de propiedades de la madera de teca. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Molina, M., Gutierrez, B., & Ipinza, R. (2001). *Comportamiento de la heredabilidad y los "rankings" individuales en un ensayo de progenies-procedencias de Eucalyptus nitens en función del tiempo e intervenciones de raleo*. Informe de conferencia , Simposio Internacional IUFRO.
- Murillo, O. (1992). Metodología para diseño y el establecimiento de rodales semilleros. *Tecnología en Marcha*, 11(Número especial), 1-4.
- Murillo, O. (2001). Genotype by environment interaction and genetic gain on unbalanced Pinus oocarpa provenances trials. *Agronomía Costarricense*, 25(1), 21-32.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004a). *Breeding teak in Costa Rica*. IUFRO Meeting, Forest Genetics and Genomics, Charleston, South Carolina, USA.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004b). *Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal*. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago.
- Murillo, O., Wright, J., Monteuis, O., & Montenegro, F. (2013). *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. Turrialba: CATIE.

- Muslimin, I., Sofyan, A., & Islam, S. (2013). Genetic Parameter Estimates in a Clonal Test of Teak (*Tectona grandis* L. F) at 5,5 Years Old in South Sumatera. *Jurnal Pemuliaan Tanaman Hutan*, 7(2), 97-106.
- Ortiz, E. (2014). Atlas digital de Costa Rica. Cartago.
- Pastrana, I., Espítia, M., & Murillo, O. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de Acacia mangium Willd. *Acta Agronómica*, 143-150.
- 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), 2-3.
- Pérez, R. (2016). *Evaluación de ensayos genéticos de teca (Tectona grandis L.f.) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica S.A.* Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Salas, R. (2012). *Evaluación de un ensayo genético de Gmelina arborea en Siquirres, Limón.* Tesis de pregrado, Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Salaya, J., López, J., & Vargas, J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de Pinus patula. *Agrociencia*, 46(5), 519-534.
- Solano, J., & Villalobos, R. (3 de Junio de 2011). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José.
- Tamarit, J., De los Santos, H., Aldrete, A., Valdez, R., Ramírez, H., & Guerra, V. (2013). Sistema de cubicación de árboles individuales de *Tectona grandis* L.f mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21).
- Vega, U. (1990). *Problemario de mejoramiento genético en plantas.* Caracas, Venezuela: Miguel Ángel García e Hijo, s.r.l.
- Zamudio, F., & Guerra, F. (2002). *Reproducción selectiva de especies forestales de rápido crecimiento con énfasis en el género Populus.* Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestal .

Anexo 1. Heredabilidad media clonal y valor de exactitud en el DAP y el volumen total para siete ensayos clones de *Tectona grandis* en Costa Rica y Nicaragua (valores respuesta únicamente con el material genético que coincide entre los ensayos).

Localidad	País	Edad (años)	DAP		Volumen total	
			h ² mc	Exactitud	h ² mc	Exactitud
Santa Clara	Costa Rica	1,76	66,09	81,29	58,41	76,43
Aló Central	Nicaragua	1,78	71,42	84,51	69,03	83,09
Jicaral	Costa Rica	1,86	55,07	74,21	64,7	80,44
Cariari	Costa Rica	1,96	58,73	76,64	56,91	75,44
La Garita	Costa Rica	4,02	69,12	83,14	71,12	84,33
Jicaral	Costa Rica	4,04	58,59	76,55	70,04	83,69
Garza	Costa Rica	4,04	65,08	80,67	60,64	77,87