

Artículo de investigación

GANANCIA GENÉTICA ESPERADA EN TECA (*Tectona grandis* L.f.) EN CÓRDOBA (COLOMBIA)

Expected genetic gain in teak (*Tectona grandis* L.f.) in Córdoba (Colombia)

Palabras clave: árboles plus, calidad, diferencial de selección, índice de selección, teca,

Key words: plus trees, quality, selection differential, selection index, teak.

*Miguel Espitia C*¹

*Olman Murillo G*²

*Carlos Castillo P*³

RESUMEN

El departamento de Córdoba (Colombia) programó plantar 200000 ha forestales para el 2025. La teca se priorizó por su adaptación, calidad de madera y valor en los mercados asiáticos. El objetivo del estudio fue estimar la ganancia genética esperada en la selección fenotípica de árboles plus, en 5316 ha comerciales de teca en Córdoba para el diámetro a la altura del pecho, altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste. La selección se basó en la evaluación fenotípica del árbol candidato y sus cuatro mejores vecinos en un radio de 20 m, calificando individualmente la calidad de las primeras cuatro trozas de 2,5 m de largo. Los árboles seleccionados se clasificaron en lista A cuando superaron en volumen y calidad en el diferencial de selección a sus cuatro mejores vecinos, y en lista B, los árboles superiores solamente en volumen o calidad. La ganancia genética se estimó mediante el producto del diferencial de selección X heredabilidad en sentido estricto promedio reportada. Se construyó un índice de selección que integró de forma ponderada el volumen (60%) con la calidad (40%). De 46 árboles seleccionados, dieciocho fueron clasificados como plus A. Al

seleccionar y clonar los dieciocho mejores árboles A, se esperan ganancias genéticas de 5.52%; 17.50%; 41.71% y 9.59%, para el diámetro, altura, volumen y calidad del fuste, respectivamente. Los resultados sugieren un progreso genético importante de la teca en Córdoba, siempre y cuando se amplíe la base genética del programa y se comprueben los resultados mediante ensayos genéticos en varias zonas productoras potenciales.

ABSTRACT

The Córdoba department of Colombia programmed to establish 200000 ha of forest plantations by year 2025. Teak was prioritized by its adaptation, wood quality and value in the asian markets. The objective of this research was to estimate the expected genetic gain, of phenotypically selected plus trees in 5316 ha plantation in Córdoba, for diameter at breast height, commercial height, commercial volume and log quality traits. The selection based on the phenotypic evaluation of the tree candidate and its four best neighbors within a 20 m radius, qualifying, individually the first four segments of 2.5 m length. Selected trees were classified in list A as determined to be superior in both, volume and

¹ Universidad de Córdoba. Diagonal 50 No. 8-105, Barrio Villa del Río, Montería (Córdoba). mespitia@sinu.unicordoba.edu.co. Autor para correspondencia.

² Instituto Tecnológico de Costa Rica. olmuga@yahoo.es

³ Universidad de Córdoba.: carloscastillo1232@hotmail.com

quality, according to the selection differential to all its four best neighbors. List B included those plus trees found superior only in commercial volume or in stem quality. Genetic gain was estimated by multiplying selection differential X average narrow sense heritability. We estimated a Selection Index that integrate commercial volume (60%) and stem quality (40%). From 46 selected trees, 18 were classified as plus A. In selecting and cloning the 18 best A plus trees, based on the Selection Index, we expected genetic gains of 5.52% (diameter); 17.50% (height); 41.71% (commercial volume) and 9,59% (stem quality). These results suggest an important genetic progress breeding teak in Cordoba, as long as they broaden the genetic base of the program and verify results with genetic testing in various potential production areas.

INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con 25 millones de hectáreas con aptitud forestal aproximadamente, de las cuales el departamento de Córdoba posee 897086 ha (CONIF 2003, MADR 2005, Rincón 2009). En Córdoba existen 15000 ha de plantaciones forestales (nativas e introducidas) y en los próximos 25 años se espera plantar 200000 ha en las principales zonas productoras (CFC 2000, CONIF 2003). Entre las especies introducidas plantadas para la producción de madera con fines comerciales, en orden de mayor participación, se encuentran la teca (*Tectona grandis* L.), la acacia (*Acacia mangium* Willd.) y la melina (*Gmelina arborea* Roxb.), con un 25.8%, 24.9% y 5% del área plantada, respectivamente. En ese mismo orden, son las que proveen la mayor cantidad de madera de alta calidad para abastecer la demanda en el mercado internacional (Rincón 2009).

La teca es una especie latifoliada que pertenece a la familia Verbenaceae (Fonseca 2004), con una distribución natural discontinua. Muchos autores citan que la especie es originaria del sureste asiático, principalmente de Burma o Birmania, ahora Myanmar, Tailandia, la India, Malasia, Java, Indochina y la República Democrática Popular de Laos, entre los 12 y 25° latitud Norte y de 73 a 104° longitud Este. En la zona de distribución

natural, los bosques son de tipo monzónico, desde bosque seco tropical hasta bosque húmedo tropical. La teca es un árbol de fuste recto, con dominancia apical y puede alcanzar más de 50 m de altura y 2 m de diámetro en su lugar de origen. En Costa Rica y en Colombia, alcanza alturas superiores a los 35 m en los mejores sitios. Crece desde 0 a 1000 m de altitud y se adapta a gran variedad de suelos, pero prefiere suelos planos, aluviales, de texturas franco-arenosas o arcillosas, profundos, fértiles, bien drenadas y con pH neutro o básico. Las plantaciones de teca mejoran la calidad de los sitios, en cuanto las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Fonseca 2004).

La madera de teca por su solidez, resistencia, trabajabilidad, calidades estéticas y variedad de uso, es la madera tropical con mayor demanda y valor de sus productos en el mercado internacional (Trujillo 2009, Ladrach 2010). En Córdoba, se siembra hace más de 40 años y está reconocida como una especie potencial para ser utilizada en proyectos de reforestación comercial (CONIF 1998). La actividad forestal ha aumentado significativamente como consecuencia de la escasez de madera del bosque natural y la creciente demanda de productos forestales por parte de la población. Sin embargo, para convertir la actividad forestal en un proceso productivo, rentable y seguro, es necesario desarrollar programas de mejoramiento y manejo que conduzcan a la obtención de materia prima de la más alta calidad, con el menor costo posible (Murillo & Badilla 2004).

El desarrollo de las tecnologías de propagación *in vivo* ha permitido grandes progresos en el cultivo de eucaliptos en el mundo (Xavier *et al.* 2009), donde la productividad avanzó de 200 m³ ha⁻¹ en la década los años setenta, hasta superar actualmente la barrera de los 400 m³ ha⁻¹ en el ámbito operativo, con resultados de investigación que superan los 500 m³ ha⁻¹ en 7 años. Estos resultados son el producto de la visión de las plantaciones como un cultivo, en el que confluyen tres componentes vitales: suelo + semilla + manejo (Murillo & Badilla, 2005). Sin embargo, los principales problemas para la producción forestal en el país y en el departamento

de Córdoba, específicamente con *T. grandis*, radican en: bajo rendimiento; escasez de semilla (sexual o asexual) como material base para atender la demanda de siembra; dificultad para importar semilla (sexual o asexual) mejorada para siembra; como parte de la ausencia de un programa de mejoramiento genético en la región (CFC 2000).

El éxito de un programa de mejoramiento genético depende de la calidad y la intensidad de selección (rigor) de los árboles parentales. Las ganancias esperadas dependen tanto del control genético de las características de interés como de la variabilidad existente en la población (Zobel & Talbert 1988, Balcorta & Vargas 2004). La heredabilidad en sentido estricto y el diferencial de selección son útiles para predecir la respuesta de la selección en especies forestales (Zobel & Talbert 1988). El diferencial de selección es importante porque está altamente correlacionado con la ganancia genética, que es el fin de un programa de mejoramiento genético (Balcorta & Vargas 2004).

De manera general, se ha utilizado el diferencial de selección fenotípico obtenido durante la selección de los árboles plus, como base para estimar el progreso genético esperado en teca (Vallejos *et al.* 2010). Las estimaciones de ganancia genética esperada le permiten al mejorador forestal conocer su progreso genético potencial y decidir al inicio del programa cuáles individuos componen la población

comercial y cuáles la población de mejoramiento (Vallejos *et al.* 2010). Existen diversos reportes de varios países sobre intensidad de selección y ganancia genética para varios caracteres de interés del árbol en diferentes especies forestales (Botrel *et al.* 2007, SangUrk *et al.* 2007, Blada & Popescu 2008; Oh *et al.* 2008, Rocha *et al.* 2009, Verryn *et al.* 2009, Vallejos *et al.* 2010). En Colombia, se han reportado ganancias genéticas esperadas para caracteres como el DAP, la altura total y la forma del fuste en varias especies nativas *Alnus jorullensis*, *Cariniana pyriformis*, *Cordia alliodora*, *Genipa americana* y *Tabebuia rosea* (Rodríguez & Nieto 1999), pero no se encontró documentación que referencien a *T. grandis*.

El objetivo de este trabajo fue estimar la ganancia genética esperada, con base en la selección fenotípica de los mejores 46 árboles plus seleccionados en 5316 ha de teca, de plantaciones comerciales del departamento de Córdoba, como parte del desarrollo de un programa de mejoramiento genético con esta especie en dicho territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó durante los años 2008 y 2009, en seis plantaciones comerciales de teca (*T. grandis*) del departamento de Córdoba (Colombia), de 8 a más de 20 años de edad, las cuales sumaron un total de 5316 ha (Tabla 1).

Tabla 1. Localización (municipios y finca) de las plantaciones donde se realizó la selección de árboles plus de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia

Municipio	Finca	Área reforestada (ha)	Coordenadas	
			Latitud (N)	Longitud (W)
Puerto Libertador	Reforestadora del Caribe	2200	7°51'33,2"	75°43'22,4"
Canalete	Hacienda El Páramo	2700	8°37'46,3"	76°15'04,3"
Canalete	Palma Vino	130	8°44'02,3"	76°15'55,3"
San Antero	Refopal	150	9°18'26,6"	75°50'20,6"
Momil	Santo Tomás	6	9°20'11,2"	075°38'14,5"
Montería	Santa Elena	130	8°33'48,9"	75°58'40,7"
Total		5316		

El proceso de selección de los árboles plus se realizó mediante visita y participación de trabajadores de las plantaciones, utilizando la metodología propuesta por Zobel & Talbert (1984) y adaptada por Vallejos *et al.* (2010). Se diferenciaron los árboles plus en categoría A, si superaban claramente todos y cada uno de sus mejores vecinos inmediatos (comparadores), en todos los caracteres evaluados. La categoría B se definió para aquellos candidatos a plus, que no lograron registrar su superioridad hacia alguno de sus mejores vecinos o en alguno de los caracteres de selección evaluados. Se asumió así, que los árboles de la categoría B formarían también parte de la población de mejoramiento, pero no de la población comercial, hasta tanto los ensayos genéticos de comprobación determinaran su permanencia y estatus dentro del programa.

La selección de los árboles ocurrió en dos fases: a) preselección de los mejores candidatos de toda la plantación y b) sanción o verificación de la superioridad fenotípica de los candidatos preseleccionados. La primera fase del procedimiento se basó en una revisión exhaustiva de toda el área plantada, buscando los fenotipos sobresalientes en altura total, altura comercial, calidad del fuste y volumen. Por tanto, esta preselección implicó una primera estimación de la intensidad de selección i , que consistió en la relación de los elegidos versus la población total original de individuos de la plantación. La segunda fase de selección revisó las características del candidato y se comparó contra los mejores cuatro vecinos en un radio de aproximadamente 20 m, tal y como se explica en detalle más adelante. Los candidatos que lograron superar la fase de verificación se constituyeron en árboles plus, que comprendieron entonces la población base de mejoramiento. Entonces, su número fue utilizado como estimador de la intensidad de selección i de la población original que dio origen a la plantación.

Todos los árboles preseleccionados y sancionados en cada lote fueron identificados y georeferenciados, para poder coleccionar su semilla posteriormente. La selección se basó en la evaluación fenotípica

del árbol candidato y sus cuatro mejores vecinos en un radio de 20 m, considerando los siguientes caracteres deseables: a) árbol sin gambas, b) fuste rectilíneo, c) pocos nudos, d) copa del árbol pequeña y simétrica, e) ramas delgadas con ángulo de inserción de 45 a 90°, f) dominante en altura, g) sanidad del árbol, h) diámetro a la altura del pecho (DAP), i) altura comercial (h_{COM}) y j) calidad del fuste (CALI); calificando en forma individual las primeras cuatro trozas de 2.5 m de largo con base en una escala de 1 a 4, donde un valor de 1 es la mejor calidad posible y un valor de 4 se asigna para trozas sin valor como madera sólida (Murillo & Badilla 2004).

El volumen comercial (Vol_{COM}) se estimó utilizando la fórmula de conicidad que incorpora el DAP y la h_{COM} , así: $Vol_{COM} = [(DAP/100)^2 * 0.7854 * h_{COM} * 0.70]$. La CALI del árbol se estimó con el promedio ponderado de la calidad individual de sus primeros cuatro trozas comerciales. El peso ponderado de la troza en el fuste se basó en su aporte al volumen total de los primeros 10 m de fuste (Murillo & Badilla 2004):

Troza 1 = 40%	(0 a 2.5m)
Troza 2 = 30%	(2.51 a 5m)
Troza 3 = 20%	(5.01 a 7.5m)
Troza 4 = 10%	(7.51 a 10m)

El valor de calidad del árbol (CALI) se convirtió en una variable cuantitativa que registra valores de 1 a 4. Los árboles seleccionados se clasificaron en dos listas A y B. En la lista A, se incluyeron los árboles que registraron superioridad tanto en Vol_{COM} como en CALI, con base en el diferencial de selección: $S = [(Y_{\text{árbol seleccionado}} - \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}) / \bar{Y}_{\text{árboles vecinos}}] * 100$ y en la lista B, cuando superaron solamente en Vol_{COM} o en CALI a todos sus mejores vecinos. La CALI se transformó de la escala original de 1 a 4 a una escala de 1 a 100 para facilitar su comprensión e interpretación, así: $CALI_{\text{Invertida}} = 100 * \{1 - [(CALI - 1) / 3]\}$. Con los valores obtenidos de S, se estimó el diferencial de selección promedio por: lote o plantación; todos los árboles seleccionados; y árboles seleccionados en la lista A (Zobel & Talbert 1984; Vallejos *et al.* 2010).

La ganancia genética (GG) se estimó mediante la siguiente ecuación (Zobel & Talbert 1984, Murillo *et al.* 2004, Cruz 2005, Vallejos *et al.* 2010):

$$GG = S \cdot h^2$$

Dónde: S es el diferencial de selección y h^2 es la heredabilidad en sentido estricto promedio, reportada para un grupo amplio de especies tropicales: $h^2_{\text{Diámetro}} = 0.20$; $h^2_{\text{Altura}} = 0.25$; $h^2_{\text{Volumen}} = 0.25$ y $h^2_{\text{Calidad}} = 0.35$ (Cornelius 1994).

Con la GG obtenida, se construyó un índice de selección (IS) que integró de forma ponderada el Vol_{COM} con la CALI, así (Murillo *et al.* 2004; Vallejos *et al.* 2010):

$$IS = [(0.6 \cdot Vol_{\text{COM}}/ds) + (0.4 \cdot CALI/ds)]$$

Donde ds es la desviación estándar de cada carácter.

Con base en el IS se obtuvieron los mejores árboles plus seleccionados, los cuales pueden constituir la población comercial (plus A) y el resto de los árboles (plus B) forman parte únicamente de la población de mejoramiento e investigación. Todos los cálculos en este estudio se realizaron en la hoja electrónica de Excel.

RESULTADOS

ÁRBOLES PLUS SELECCIONADOS E INTENSIDAD DE SELECCIÓN

En la tabla 2, se puede observar que el proceso de selección realizado en las 5316 ha muestreadas permitió identificar un total de 46 árboles plus por sus características fenotípicas sobresalientes. Solo cuatro plantaciones de seis muestreadas permitieron identificar árboles superiores. El número de árboles seleccionados por lote osciló entre uno y veintiuno.

Con base en el proceso de selección anterior, se obtuvo una intensidad de selección por lote que osciló entre uno por cada 2200 (Santo Tomás) a 1 por cada 48333 árboles (Hacienda el Páramo).

Tabla 2. Árboles seleccionados e intensidad de selección por lote en las poblaciones estudiadas de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia

Municipio	Finca	Árboles plus Seleccionados	Intensidad de Selección (árboles)
Puerto Libertador	Reforestadora del Caribe	21	1 de 37400
Canalete	Hacienda El Páramo	12	1 de 48333
Canalete	Palma Vino	0	0
San Antero	Refopal	12	1 de 20625
Momil	Santo Tomás	1	1 de 2200
Montería	Santa Elena	0	0
Total (A+B)		46	1 de 36193
Plus A		18	1 de 92493

Esto originó una intensidad de selección promedio de un árbol seleccionado por cada 36.193 árboles evaluados (tabla 2), lo que equivale aproximadamente a un árbol por cada 30.5 ha.

De los 46 árboles seleccionados, el 39%, aproximadamente (dieciocho árboles), superó a sus mejores vecinos en los dos criterios, volumen y calidad (Plus A). Mientras que el 61% restante de los árboles seleccionados (veintiocho), solo superaron a sus árboles vecinos en volumen o en calidad (Plus B). La intensidad de selección para los dieciocho árboles plus A, fue de uno cada 92493 árboles.

DIFERENCIAL DE SELECCIÓN, GANANCIA GENÉTICA ESPERADA E ÍNDICE DE SELECCIÓN

En la tabla 3, se observa que el diferencial de selección promedio (%) varió con el tipo de lote y los cuatro caracteres evaluados. Aun cuando el número de árboles seleccionado en cada lote fue diferente, el que permitió lograr los mayores diferenciales de selección en volumen comercial (Vol_{COM}) fue Refopal (90.47%). Mientras que el mayor diferencial de selección en calidad del fuste (CALI), se registró en Reforestadora del Caribe (25.25%), seguido por Páramo (24.23%) y Refopal (23.51%). Entre los cuatro caracteres, el mayor

Tabla 3. Diferencial de selección promedio (S) por finca, de los árboles plus de *T. grandis* seleccionados en el departamento de Córdoba, Colombia. Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h_{COM}), Volumen comercial (Vol_{COM}), Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100 e Índice de Selección (íntegra Volumen Comercial*0.6 con la calidad*0.4)

Finca	Árboles	S DAP (%)	S h_{COM} (%)	S Vol_{COM} (%)	S CALI (%)	Índice de Selección (IS) (%)
Canalete (Páramo)	12	7.31	54.79	79.75	24.23	36.90
San Antero (Refopal)	12	16.60	39.69	90.47	23.51	29.41
Momil (Santo Tomás)	1	8.68	53.85	78.37	18.65	30.91
Puerto Libertador (Reforestadora del Caribe)	21	5.84	57.80	73.21	25.25	49.45
Global (A+B)	46	10.32	55.00	88.99	23.70	34.82
Plus A	18	22.07	58.33	139.02	23.98	37.90

diferencial de selección se registró en el volumen comercial (Vol_{COM}), seguido por la altura comercial (h_{COM}), calidad del fuste (CALI) y diámetro a la altura del pecho (DAP) con valores promedios de 88.99, 55.00, 23.70 y 10.32%, respectivamente.

El diferencial de selección para la calidad de las primeras cinco trozas –de 2.5 m de largo cada una– presentado en la tabla 4, indica que los árboles plus A superaron a sus mejores vecinos entre 1.46% (primera troza: altura de 2.5 m) y 92% (cuarta troza: altura de 10 m). La anterior ventaja, si se considera el peso económico de cada troza en porcentaje, se traduce en una diferencia total del 39.37%, en calidad, a favor de los árboles plus A en comparación con sus mejores vecinos. Igualmente, se deduce que los árboles plus A y A+B registraron

no solo una mayor altura comercial promedio (12.5 m o cinco trozas por árbol), en relación con sus mejores vecinos (8.20 m o tres trozas productivas por árbol), sino también una mucha mejor calidad. Esto representa un alto impacto en el potencial industrial al seleccionar y utilizar (vía clonación) estos árboles superiores en un programa de reforestación comercial.

Al comparar los valores promedios de los dieciocho árboles plus A, los 46 árboles seleccionados (A+B), en comparación con grupo de 184 mejores vecinos utilizados como testigos (tabla 5), se puede detectar un incremento de los árboles plus A de 58.33% y 23.98%, en altura comercial (h_{COM}) y calidad del fuste (CALI), respectivamente, con respecto a los testigos.

Tabla 4. Diferencial de selección en relación con la calidad de las primeras cinco trozas (2.5 m de largo) entre los árboles plus y sus mejores vecinos, de *Tectona grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia

Altura en el fuste (m)	Árboles Plus (A + B)	Árboles Plus A	Mejores Vecinos	Diferencia con Plus A (%)	Diferencia con Plus A según importancia de troza (%)	Peso económico de la troza (%)
12.5	0.67	0.79	0.00	79.00	3.95	5
10	0.79	0.92	0.00	92.00	13.80	15
7.5	0.93	0.97	0.53	82.11	16.42	20
5.0	1.00	1.00	0.84	18.77	4.69	25
2.5	1.00	1.00	0.99	1.46	0.51	35
Total					39.37	100

Tabla 5. Valores promedios para altura comercial (h_{COM}), diferencial de selección de la altura comercial (h_{COM} %), Calidad del fuste (CALI) y diferencial de selección en calidad del fuste (CALI %), en los árboles plus seleccionados y en los mejores vecinos de *T. grandis* en el departamento de Córdoba, Colombia. Altura comercial (h_{COM}) y calidad del fuste (CALI) de 0 a 100. Desviaciones estándar entre paréntesis

Grupo	Árboles	h_{COM} (m)	Diferencial h_{COM} (%)	CALI	Diferencial CALI (%)
Plus A	18	12.54 (0.59)	58.33 (5.79)	0.99 (0.010)	23.98 (2.22)
Plus (A+B)	46	12.24 (0.36)	55.00 (3.97)	0.96 (0.011)	23.70 (1.48)
Testigos (mejores vecinos)	184	8.20 (0.15)		0.78 (0.099)	

En la tabla 6, se presentan los resultados en diferencial de selección (S), ganancia genética esperada (GG) e índice de selección (IS) en los cuatro caracteres estudiados, con los 46 árboles plus seleccionados (A+B) y los dieciocho árboles plus A, utilizando semilla sexual (semilla) o clonándolos directamente (clon). Los resultados del diferencial de selección (S) que se determinan son los mismos que se analizaron en la tabla 3, solo que esta vez se les adicionó una desviación estándar al valor promedio.

Entre los cuatro caracteres considerados en el proceso de selección, los mayores niveles de ganancia genética esperada se obtuvieron en altura comercial (h_{COM}) y volumen comercial (Vol_{COM}), tanto cuando se emplea la semilla sexual o se toma la decisión de clonar los árboles seleccionados. Las ganancias genéticas para h_{COM} oscilaron entre 13.75% (A+B, semilla) y 17.50% (A, clon); mientras que para el Vol_{COM} las ganancias

estuvieron entre 22.25% (A+B, semilla) y 41.71% (A, clon), con respecto a los mejores árboles vecinos, considerados como testigos o población base (Tabla 6).

DISCUSIÓN

La variación en el número de árboles seleccionados por finca varió en forma significativa, debido fundamentalmente a las diferencias en tamaño de las plantaciones, las cuales oscilaron entre 6 y 2700 ha (Tabla 1). La variabilidad y el origen genético de la semilla sexual –semilla de áreas productoras de semilla de libre polinización, según información de la administración de la plantaciones– utilizada para la siembra de las plantaciones fue muy amplia, lo cual se pudo detectar en la visita de selección y eliminación de árboles en las plantaciones, hasta el punto que en dos de ellas (Palma Vino y Santa Elena) no se incluyó ningún árbol superior.

Tabla 6. Diferencial de selección (S) y ganancia genética (GG) esperada por categoría de árboles plus de *T. grandis* seleccionados en el departamento de Córdoba, Colombia. Diámetro a la altura del pecho (DAP), Altura comercial (h_{COM}), Volumen comercial (Vol_{COM}) y Calidad del fuste (CALI) en una escala de 0 a 100. *La calidad se evaluó solamente en veintiocho árboles plus. Desviaciones estándar entre paréntesis.

Caracteres	S (%)	S (%)	GG (%)	GG (%)	GG (%)	GG (%)
	Plus (A + B)	Plus A	(A + B, semilla)	(A, semilla)	(A + B, clon)	(A, clon)
DAP	10.32 (2.13)	22.07 (9.28)	2.06	4.41	2.58	5.52
h_{COM}	55.00 (3.97)	58.33 (5.79)	13.75	14.58	16.5	17.50
Vol_{COM}	88.99 (10.37)	139.02 (20.49)	22.25	34.75	26.70	41.71
CALI	23.70 (2.31)	23.98 (2.22)	8.29	8.39	9.48	9.59
Índice de Selección (IS)	34.82 (2.44)	37.90 (3.63)	12.18	13.26	13.93	15.16

La intensidad de selección promedio resultó ser mayor que la reportada por Vallejos *et al.* (2010) en selecciones de teca en Costa Rica, donde se registró un árbol plus por cada 15000 a 20.000 individuos, lo que demuestra el rigor y exigencia en el proceso de selección de los mejores árboles en las plantaciones revisadas en Córdoba. Si se observa la intensidad de selección en los árboles plus A, resultó ser más exigente que la reportada por Balcorta & Vargas (2004), Murillo & Badilla (2009) y Espitia *et al.* (2010), quienes reportan intensidades de un árbol plus por cada 1111 individuos; un árbol por cada 15000 a 20000 individuos y un árbol plus por cada 10622 a 30538 individuos, respectivamente. De igual forma, nuestras intensidades de selección fueron superiores a las recomendadas por Zobel & Talbert (1984), quienes sugieren intensidades de selección de 1: < 20 para rodales semilleros y 1: > 1000 para huertos semilleros. Los valores de intensidad de selección obtenidos en este estudio se consideran suficientes para el comienzo de un programa de mejoramiento genético, ya que, además de permitir identificar un número importante de árboles superiores, permite iniciar con una colección de árboles con un potencial genético alto y de procedencia variable que garantizan un programa exitoso.

DIFERENCIAL DE SELECCIÓN

Los resultados de diferencial de selección registrados en esta investigación son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *Acacia mangium* por Espitia *et al.* (2010) e igualmente superiores a los reportados en melina por Kumar *et al.* (2006) y Balcorta & Vargas (2004), quienes registraron valores de 40%, para altura total, y 40% para volumen comercial respectivamente. A pesar de lo anterior, se debe tener presente, como lo señalan Vallejos *et al.* (2010), que estos valores de diferencial de selección son, por lo general, más bajos de lo que en realidad ocurre, debido a que cada árbol plus fue evaluado contra sus mejores cuatro vecinos. Por tanto, estos vecinos son competidores muy fuertes y no reflejan la población base ordinaria (sin mejoramiento), que usualmente se obtiene de los viveros comerciales. Por tanto, el

verdadero diferencial de selección que se presenta en este tipo de programas, usualmente, es superior de manera significativa a la población base.

La misma tendencia en el diferencial de selección se pudo observar en los cuatro caracteres evaluados, cuando solo se consideraron los dieciocho árboles plus A. Los valores más altos se registraron en: Vol_{COM} (139.02%), h_{COM} (58.33%), CALI (23.98%) y DAP (22.07). Estos resultados reflejan una superioridad genética potencial de los dieciocho árboles plus A, con respecto a los 46 seleccionados (A+B), especialmente, en Vol_{COM} (50,03 puntos más en porcentaje) y DAP (11.75 puntos más en porcentaje). Los valores de diferencial de selección registrados en este estudio son similares en tendencia y magnitud a los encontrados en *A. mangium*, por Espitia *et al.* (2010), y mayores a los reportados por Vallejos *et al.* (2010), en teca de 22.88%, en volumen, y 21.83% en calidad, así como los encontrados por Murillo & Badilla (2003) en teca, con diferencial de selección para el volumen comercial del 24% superior en las mejores familias y del 39% más que los testigos. Asimismo, es similar a los valores relacionados por Balcorta & Vargas (2004), quienes registraron diferenciales de selección de un 40% para altura y 40% para volumen comercial, respectivamente, en relación con la población original.

Se destacan dos resultados importantes del proceso de selección: primero, los mayores índices de selección (IS) se presentaron en las plantaciones de Reforestadora del Caribe (IS= 49.45) y el Páramo (IS= 36.90), ubicadas en el municipio de Puerto Libertador y Canalete, respectivamente (Tabla 3). Estos resultados evidencian que en estas poblaciones se encuentra la mayor cantidad de árboles seleccionados con las mejores características en crecimiento, volumen y calidad del fuste. Segundo, se presentó superioridad en el índice de selección de los dieciocho árboles plus A (IS= 37.90) sobre los 46 árboles seleccionados (IS= 34.82). Este es un resultado esperado que se explica porque los individuos plus A superan tanto en volumen como en calidad a los mejores vecinos o testigos.

GANANCIA GENÉTICA ESPERADA

Los resultados obtenidos sobre ganancia genética esperada son similares o mayores a los reportados por varios autores: Espitia *et al.* (2010), quienes, en *Acacia mangium*, registraron ganancias genéticas esperadas en promedio de árboles plus A del 22.24% y el 48.57% en altura y volumen comercial, respectivamente; Vallejos *et al.* (2010), a su vez, relacionan ganancias genéticas esperadas, en general, entre 20-25% en volumen; Mesén (2001), quien estimó ganancias genéticas en melina del 17% en altura y el 43% en DAP; Cornelius & Hernández (1994), en la misma especie, reportaron ganancias genéticas de hasta un 12% en rectitud del fuste; Kumar *et al.* (2006), en melina en el ámbito clonal, encontraron para altura, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho, ganancias de un 18%, 25% y 30%; Rojas & Arias (2004), en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr., en la zona del Pacífico sur de Costa Rica, con ganancias del 23% en volumen. Los resultados de este estudio evidencian el riguroso proceso de selección realizado en las plantaciones evaluadas y permiten vaticinar un importante progreso genético.

En la tabla 6, se observa que se pueden lograr mayores ganancias genéticas en el programa de mejoramiento, si se emplean solamente los dieciocho árboles plus A, en vez de utilizar todos los 46 árboles seleccionados (A+B), tanto utilizando su semilla o clonándolos. En DAP, se lograría un progreso genético de 2.35% adicional y de 12.5% adicional en el Vol_{COM} . Resultados similares en *Acacia mangium* fueron reportados por Espitia *et al.* (2010).

En general, para los cuatro caracteres de interés incluidos en el estudio, el progreso genético esperado es mayor al clonar los dieciocho árboles plus A (A, clon) que al utilizar su semilla (A, semilla), debido al mayor control genético que se logra con la clonación. Los valores de superioridad adicional oscilan entre un 1.11% (DAP) y un 6.96% (Vol_{COM}) (Tabla 6). De acuerdo con Ipinza (1998) y Murillo & Badilla (2009), esta diferencia en ganancia genética a favor de la clonación de los

árboles plus A se explica porque en la clonación se captura el 100% de la información genética (efectos genéticos aditivos y no aditivos) de los árboles plus A; mientras que cuando se utiliza la semilla sexual originada de polinización abierta, solo se captura el 50% de la información genética de los árboles plus A seleccionados (madre), ya que no se conoce al progenitor masculino.

La tendencia y la superioridad de los valores de ganancia genética esperada determinada en este estudio son consistentes con los IS obtenidos, los cuales oscilaron entre 12.18% (A+B semilla) y 15.16% (A, clon) para las cuatro estrategias de mejoramiento posibles (Tabla 6). Esto señala que los árboles plus A, cuando son clonados (A, clon), generan la mayor ganancia genética esperada en volumen y calidad (IS = 15.16%), comparado con el uso de la semilla de tales árboles (A, semilla: IS = 13.26%) para obtener nuevas progenies. Lo anterior implica que se esperaría una respuesta importante a la selección para los cuatro caracteres en estudio. De igual forma, de acuerdo con los valores de diferencial de selección, ganancia genética esperada y los índices de selección obtenidos, se puede argumentar que la clonación de los dieciocho árboles plus A seleccionados, producirá una población de árboles con mayores características de crecimiento y superior de calidad del fuste en las siguientes generaciones. Esto permitirá aumentar los rendimientos, la productividad y la calidad de la materia prima, en beneficio directo a los productores de madera y la industria, al producir árboles más homogéneos y menores desperdicios al momento de la cosecha. Este tipo de programas contribuirá significativamente con hacer más sostenible, atractivo y equitativo el negocio forestal en el departamento de Córdoba y, en Colombia, en el largo plazo, dado a que la teca es una de las especies forestales que más se planta para la producción de madera sólida en las regiones tropicales del mundo.

Considerando que con incrementos del 4% por conceptos de ganancias genéticas en volumen se cubren los costos de un programa de mejoramiento

genético forestal (Ipinza 1998), los resultados obtenidos en este estudio permiten deducir una alta rentabilidad económica en el programa que se adelanta en Córdoba.

De acuerdo con Murillo & Badilla (2009), utilizando la estrategia de clonación de los árboles plus A, en aproximadamente 1 a 2 años se puede iniciar con el establecimiento de plantaciones clonales comerciales con material de alto rendimiento. Mientras que si se utiliza la estrategia de semilla sexual (familias de medios hermanos), en aproximadamente 6 a 8 años –dependiendo de las condiciones edafológicas y climatológicas de la zona– se tiene semilla mejorada para abastecer la demanda de plantaciones.

A lo anterior se le debe adicionar que la teca es una especie que se propaga vegetativamente y rebrota fácilmente. Los árboles plus seleccionados, incluso, pueden ser talados para iniciar su propagación vegetativa y los nuevos rebrotes pueden iniciar su propagación a partir de 6 a 8 semanas después de cortado el árbol. Estos niveles de progreso genético esperado permiten, adicionalmente, vaticinar una reducción de aproximadamente 1 a 2 años en el tiempo para alcanzar dimensiones de cosecha final, si y solo si, se siguen los principios del manejo oportuno de la plantación (Murillo & Badilla 2009). Esto generará un alto impacto y estímulo a la reforestación con teca en el departamento de Córdoba.

Los dieciocho árboles plus A, por sus características superiores, pueden ser utilizados como progenitores para siembras comerciales –población comercial–, utilizando su semilla sexual –aprovechamiento solo de la varianza genética aditiva– o clonándolos directamente –aprovechamiento de toda la varianza genética– a fin de lograr capturar la mayor ganancia genética potencial (Ipinza 1998, Mesén 2001, Murillo & Badilla 2009, Vallejos *et al.* 2010). Sin embargo, como se observa en la tabla 6, la mayor ganancia genética esperada en altura y volumen comercial se obtiene con la clonación de los dieciocho árboles plus A, con valores de 17.50% y 41.71%, respectivamente. Los árboles

plus B (veintiocho restantes) no se incorporarán a la población comercial, dado que representan una condición de superioridad solamente en uno de los dos caracteres volumen o calidad. Por tanto, formarán parte de la población de mejoramiento (investigación y desarrollo) y se mantendrán a la espera de su evaluación genética y su utilización en los cruzamientos controlados en el programa de mejoramiento de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009) y Vallejos *et al.* (2010).

Los resultados encontrados le permiten igualmente al mejorador forestal, de acuerdo con sus recursos económicos y de suelos, definir si incluye en sus ensayos de progenies y de clones todos los 46 árboles seleccionados (A+B) o si se evalúa en tales pruebas solamente los dieciocho árboles plus A. Una prueba de progenie o clonal de los dieciocho árboles, replicada en al menos tres ambientes diferentes, es aceptable en este tipo de ensayos y permitiría, después del raleo genético, contar con sendos huertos semilleros de primera generación, que ofrecerían semilla de excelente calidad genética para nuevas siembras comerciales. De igual forma, se contaría con material vegetal para clonar los mejores árboles de las mejores familias, con adaptación específica en cada ambiente. Esta estrategia haría posible que los árboles definitivos se crucen entre sí, forzando su recombinación genética, la acumulación de alelos favorables y, por consiguiente, la producción de semilla de calidad genética superior, para continuar con el proceso de mejoramiento (Ipinza 1998, Mesén 2001).

Como es de esperar, es posible que se encuentren buenos genotipos en otras empresas, organizaciones o países. Por tanto, este grupo de árboles plus A que se ha seleccionado y se ha dado inicio a un programa de mejoramiento genético de teca en Córdoba, como lo señalan Murillo & Badilla (2009), también permite el desarrollo de modelos cooperativos o de alianza e intercambio de material genético con otras empresas u organizaciones. Esta estrategia, junto con la introducción de germoplasma de nuevas procedencias fuera del país, hace posible reducir costos, aumentar variabilidad genética y reducir tasas de consanguinidad en la población de

mejoramiento, lo que permitiría seguir obteniendo ganancias genéticas durante varias generaciones.

Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba. De acuerdo con Zobel & Talbert (1984) y Xavier *et al.* (2009), este avance integrado con el proceso de silvicultura clonal, con los mejores árboles élites, puede constituir el complemento ideal de un programa de mejoramiento genético para esta especie. Adicionalmente, hace prever un aporte importante a la productividad, la competitividad y la sostenibilidad de la producción forestal en el departamento, de acuerdo con las exigencias de calidad del mercado internacional al que se pretende llegar. No obstante, es necesario corroborar este progreso genético, mediante ensayos genéticos apropiados en varias zonas productoras de Córdoba.

Según Murillo & Badilla (2009), con los resultados de los ensayos de evaluación genética se obtienen los parámetros genéticos de la población de mejoramiento –varianzas, covarianzas, componentes de varianzas, heredabilidades, correlaciones genéticas, diferencial de selección y ganancias genéticas realizadas, entre otras–. Por lo general, con esta información, se procede a eliminar un 30 a un 50% de los materiales inferiores, mientras que el material que registre un rendimiento superior, permanece para conformar la población de progenitores que darán base a la segunda generación de mejoramiento mediante un diseño de cruzamientos controlados.

Sus descendencias se evaluarán en ensayos de progeñe de segunda generación, que tardarán unos 6 a 8 años en brindar la información genética. Estos ensayos se convierten en huertos semilleros de segunda generación o se clonan los mejores individuos, dependiendo de la estrategia de mejoramiento a seguir. Por lo general, esta segunda generación de mejoramiento se espera obtenga aproximadamente otro 25% adicional en volumen y rendimiento, así como material mucho más homogéneo. De esta manera, continúan obteniéndose nuevas generaciones de mejoramiento

cada 8 a 10 años, lo cual aporta nuevo material con una ganancia genética esperada de un 20 a un 25%. La organización de las plantaciones clonales en campo se puede realizar mediante dos tipos: lotes monoclonales o lotes de clones mixtos, teniendo en cuenta las ventajas y las desventajas de cada una. En ambos tipos de plantaciones clonales, se deben utilizar no menos de quince genotipos, a fin de garantizar una variabilidad genética mínima en campo y en reducir los riesgos fitosanitarios (Murillo *et al.* 2003).

CONCLUSIONES

De los 46 árboles seleccionados, dieciocho (39%) fueron clasificados como plus A y los veintiocho (61%) restantes como plus B.

Al seleccionar y clonar los dieciocho mejores árboles plus A con base en el IS, se espera obtener ganancias genéticas de 5.52%; 17.50%; 41.71% y 9.59%, para los caracteres DAP, h_{COM} , Vol_{COM} y CALI, respectivamente. Los resultados obtenidos sugieren un progreso genético y económico significativo en el mejoramiento de *Tectona grandis* en Córdoba.

Los 46 árboles plus localizados en el departamento de Córdoba constituyen una base genética relativamente pequeña, insuficiente para sustentar un programa de mejoramiento genético a largo plazo con esta especie. Es absolutamente imprescindible realizar esfuerzos por introducir nuevas procedencias y realizar intercambio de germoplasma, a fin de ampliar la base genética de este programa. Es necesario comprobar este gran potencial de mejoramiento genético, mediante ensayos genéticos en varias zonas productoras de Córdoba.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, Universidad de Córdoba, Cadena Forestal de Córdoba, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y 3F Kanguroid, por la

cofinanciación y apoyo logístico, para la realización del proyecto Selección de árboles plus y creación de fuentes semilleras de teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y acacia (*Acacia mangium* Willd.) en el departamento de Córdoba, de la cual se originó esta publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balcorta, H. & J. Vargas. 2004.** Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 10: 13-19.
- Blada, I. & F. Popescu. 2008.** Diallel crossing in *Pinus cembra*: IV. Age trends in genetic parameters and genetic gain for growth and branching traits. Annals of Forest Research 51: 89-112.
- Botrel, M. C. G., J. R. Moreira da Silva, P. F. Trugilho, S. C. da Silva & B. F. Bruno Ricardo. 2007.** Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de eucalipto. Scientia Forestalis 76: 13-19.
- CFC-Cadena Forestal de Córdoba. 2000.** Acuerdo Regional de Competitividad para la Cadena Forestal en el Departamento de Córdoba. 14p. Versión en línea: [http://www.conif.org.co/docs/acuerdo_reg_cordoba.doc]. Fecha de consulta: 23 de diciembre del 2009.
- CONIF-Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 1998.** Guía para plantaciones forestales en Córdoba. Serie de documentación No. 34. Corporación Nacional de Investigación y Fomento forestal-CONIF; Ministerio del Medio Ambiente-MMA y Organización Internacional de Maderas Tropicales-OIMT. 48 p.
- CONIF-Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 2003.** Cadena Forestal Productiva de Córdoba. Folleto Núcleos Forestales. Fecha de consulta: 10 de abril del 2009.
- Cornelius, J. 1994.** The effectiveness of plus-tree selection for yield. Forest Ecology and Management 67: 23-34.
- Cornelius, J. & M. Hernández. 1994.** Variación genética en crecimiento y rectitud del fuste en *Gmelina arborea* en Costa Rica. Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales 10: 9-12.
- Cruz, C. D. 2005.** Principios de Genética Cuantitativa. Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV. Viçosa-Minas Gerais. 394p.
- Espitia, M., O. Murillo, C. Castillo, H. Araméndiz & N. Paternina. 2010.** Ganancia genética esperada en la selección de acacia (*Acacia mangium* WILLD) en Córdoba (Colombia). Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica 13: 99-107
- Fonseca, W. 2004.** Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L.) en Costa Rica. Heredia. Costa Rica. 115 p.
- Ipinza, R. 1998.** Mejoramiento genético forestal. Serie Técnica N°42, Programa CONIF-Ministerio de Agricultura sobre investigaciones en semillas de especies forestales nativas. INSEFOR. Santafé de Bogotá. 162 p.
- Kumar, A., Matharoo, A. K., Singh, S. & A. N. Sing. 2006.** Planting stock improvement in *Gmelina arborea*. Indian Forester 132: 691-699.
- Ladrach, W. 2010.** Expansion of pulp production in the third world. Versión en línea: [http://www.alleghenysaf.org/winter_2010.htm]. Fecha de consulta: 26 de febrero del 2010.
- MADR-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2005.** Características y estructura del sector forestal-madera-muebles en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Documento de trabajo No. 95. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrociudades Colombia. Bogotá. 63 p.
- Mesén, F. 2001.** Introducción al mejoramiento genético forestal. En: Identificación, selección y manejo de fuentes semilleras. Serie Técnica /

- No. 32. Convenio CONIF, INSEFOR y MADR. Bogotá. 118p.
- Murillo, O. & Y. Badilla.** 2003. Potencial de mejoramiento genético de la Teca en Costa Rica. En: Simposio sobre la teca. 26-28 de noviembre del 2003. Universidad Nacional. Heredia. CD.
- Murillo, O. & Y. Badilla.** 2004. Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago. 50 p.
- Murillo, O. & Y. Badilla.** 2005. ¿Qué es mejoramiento genético forestal? Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago. 14 p.
- Murillo, O. & Y. Badilla.** 2009. Reproducción clonal de árboles. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, ITCR. Cartago. 45 p.
- Murillo, O., J. L. Rojas & Y. Badilla.** 2003. 2ed. Reforestación Clonal. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. 36 p.
- Murillo, O., G. Obando, Y. Badilla & E. Araya.** 2004. GENFORES, a Costa Rican tree improvement and gene conservation cooperative. En: IUFRO Meeting. Forest Genetics and Genomics. Charleston.
- Oh, C. Y., S. U. Han, C. S. Mm, K. S. Kang & B. S. Lee.** 2008. Genetic gain and diversity in a clonal seed orchard of *Pinus Koraiensis* under various thinning intensities. *Korean Journal of Breeding Science* 40: 263-268.
- Rincón, M.** 2009. El sector forestal en Córdoba: cadena productiva forestal madera y muebles departamento de Córdoba. Informe Cadena Forestal de Córdoba. Centro de Investigaciones Turipaná-Corpoica. Córdoba. 37p.
- Rocha, R. B., A. H. Vieira, M. D. Bentes & L. M. Brum.** 2009. Avaliação genética de procedências de bandarria (*Schizolobium amazonicum*) utilizando REML/BLUP (Máxima verossimilhança restrita/Melhor predição linear não viciada. *Scientia Forestalis* 37: 351-358
- Rodríguez, J. & V. Nieto.** 1999. Investigación en semillas forestales nativas. Serie Técnica No. 43. Programa de Investigación en Semillas Forestales Nativas, INSEFOR. Convenio CONIF, Ministerio de Agricultura. Bogotá. 89p.
- Rojas F. & D. Arias** 2004. Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*). Cartago. 86p.
- SangUrK, H., K KyuSuk, C. Byoung-Hwan & K. ChangSoo.** 2007. Realized genetic gains and heritabilities for height, DBH and volume growth in open-pollinated progenies of *Pinus thunbergii*. *Korean Journal of Breeding Science* 39: 15-19.
- Trujillo, E.** 2009. Guía de reforestación. 2^{da} Edición. Los árboles. Adaptación, características, producción, usos, manual de vivero, plantación y manejo silvicultural. Profanor del Ecuador S.A. Bogotá. 255p.
- Vallejos, J., Y. Badilla, F. Picado & O. Murillo.** 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense* 33: 105-119.
- Verryn, S. D., C. L. Snedden & K. A. Eatwell.** 2009. A comparison of deterministically predicted genetic gains with those realized in a South African *Eucalyptus grandis* breeding program. *Journal of Forest Science* 71: 141-146.
- Xavier, A., I. Wendling & R. da Silva.** 2009. Silvicultura Clonal. Principios e Técnicas. Editorial Universidad Federal de Vicosa. Vicosa-Minas Gerais. 272p.
- Zobel, B & J. Talbert.** 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York. 510 p.
- Zobel, B. & J. Talbert. J.** 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México D.F. 545 p.