

ENSAYOS DE FAMILIAS F₂ DE *Eucalyptus deglupta* Y *E. grandis* CON FINES DE CONVERSIÓN EN HUERTOS SEMILLEROS

Francisco Mesén ^{1/*}, William Vásquez*, Edgar Viquez*

Palabras clave: *Eucalyptus deglupta*, *Eucalyptus grandis*, heredabilidad, fitomejoramiento.

Keywords: *Eucalyptus deglupta*, *Eucalyptus grandis*, heritability, tree improvement.

Recibido: 23/01/2007

Aceptado: 31/08/2007

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento de 25 familias F₂ de *Eucalyptus deglupta* y 28 familias F₂ de *E. grandis* en Turrialba, Costa Rica, con el objetivo de convertir los ensayos en huertos semilleros. Las familias de *E. deglupta* fueron seleccionadas de un ensayo de familias F₁ establecido en Upala, Costa Rica, mientras que las de *E. grandis* provinieron de un ensayo de familias F₁ establecido en Tucurrique y de una plantación en el CATIE, Turrialba. Se registró información sobre forma del fuste, altura y dap anualmente, además de presencia de daños por hongos. Se reporta los resultados de la última evaluación, cuando los ensayos tenían 3,8 (*E. deglupta*) y 4,4 años (*E. grandis*). Se encontró diferencias altamente significativas entre familias para todas las variables evaluadas. En *E. deglupta* se encontró heredabilidades para forma, altura y dap de 0,09, 0,29 y 0,28 y coeficientes de variación genética aditiva (CVGA) de 10,59, 9,72 y 14,89, respectivamente. Con una intensidad de selección de 1,16 se estiman ganancias genéticas de 3,7, 6,0 y 9,1% para las 3 variables, respectivamente. En *E. grandis* se encontró heredabilidades para forma, altura y dap de 0,25, 0,13 y 0,18 y CVGA de 19,93, 4,81 y 12,12, respectivamente. Con una intensidad de selección de 0,97, se esperan ganancias genéticas de 9,7, 1,7 y 5,0% para estas 3 variables, respectivamente. Se ofrecen recomendaciones prácticas para la conversión de los ensayos en huertos semilleros.

ABSTRACT

F₂ progeny tests of *Eucalyptus deglupta* and *E. grandis* with the aim of conversion into seedling seed orchards. The performance of 25 F₂ families of *Eucalyptus deglupta* and 28 of *E. grandis* was evaluated in Turrialba, Costa Rica, with the aim of converting the trials into seedling seed orchards. *E. deglupta* families were selected from an F₁ progeny test established in Upala, Costa Rica, while those of *E. grandis* were selected from an F₁ progeny test established in Tucurrique and from a plantation at CATIE, in Turrialba. Trials were evaluated annually to collect information on stem straightness, height and dbh, and presence of damage by fungi. Results are reported for the last evaluation, when the trials were 3.8 (*E. deglupta*) and 4.4 years-old (*E. grandis*). Highly significant differences were found among families for all variables evaluated. In *E. deglupta*, at 3.8 years of age, heritabilities of 0.09, 0.29 and 0.28 were found for stem straightness, height and dbh, and additive genetic coefficient variances (AGCV) of 10.59, 9.72, and 14.89 for the three variables, respectively. With a selection intensity of 1.16, expected genetic gains for these three variables are 3.7, 6.0, and 9.1%. In *E. grandis*, heritabilities for stem straightness, height and dbh were 0.25, 0.13, and 0.18, and AGCV were 19.93, 4.81, and 12.12, respectively. With a selection intensity of 0.97, expected genetic gains are 9.7, 1.7, and 5.0% for these three variables, respectively. Practical recommendations are given for the conversion of the trials into seed orchards.

1/ Autor para correspondencia Correo electrónico:
fmesen@gmail.com

* Centro Agrónomo Tropical de Investigación y
Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

Varias especies de *Eucalyptus*, en particular *E. deglupta*, *E. grandis*, *E. saligna*, y *E. camaldulensis*, están incluidas en el grupo de especies prioritarias para reforestación en la región mesoamericana (Mesén 2002), debido a su rápido crecimiento, buena forma del fuste, buena calidad de la madera y poca incidencia de enfermedades y plagas. Los eucaliptos producen una gama amplia de productos que incluyen leña, pulpa para papel, postes para cerca, postes de electrificación, madera para aserrío, y sus flores son fuente importante de néctar para las abejas. Están entre las especies forestales de más rápido crecimiento en el mundo. Los eucaliptos se adaptan bien a una amplia gama de sistemas de plantación, incluyendo plantación pura, sistemas agro-silvopastoriles, linderos, cercas, sombra y ornamentación. Por todas estas razones, han sido plantados ampliamente, tanto por pequeños propietarios como por grandes empresas transnacionales (CAB Internacional 2000).

En Costa Rica y en la región centroamericana en general, existe una demanda importante de semillas de estas especies, pero hasta la fecha no se cuenta con fuentes locales de semilla genéticamente mejorada. Por estas razones, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica inició hace varios años un programa de mejoramiento genético con 2 de las especies más importantes, *E. deglupta* y *E. grandis*. Los huertos semilleros de plántulas representan una excelente opción para este tipo de especies precoces y prolíficas (Mesén 1996, 1997), y fue la estrategia seleccionada para ambas especies.

Con *E. deglupta*, en 1990 se realizó un proceso de selección de árboles en plantaciones adultas en San Carlos, Grecia, Turrialba, Juan Viñas y Paraíso de Cartago, Costa Rica. Se seleccionaron 48 árboles plus con base en rectitud del fuste, altura, diámetro y sanidad, además de otros 4 árboles promedio, y su semilla fue recolectada para el establecimiento de ensayos de familias de polinización abierta en 3 localidades

de Costa Rica: Tuis de Turrialba, Canalete y San José de Upala. El ensayo de Canalete mostró el mejor comportamiento (Cornelius *et al.* 1995) y cuando alcanzó 7 años, se realizó una selección de los mejores 25 árboles, con base en las mismas características anteriores y se recolectó su semilla para el establecimiento de un ensayo de familias F_2 .

En el caso de *E. grandis*, en 1989 se recibió semilla de 98 familias procedentes de un huerto semillero de plántulas de Sur África y con este material se estableció un ensayo de familias F_1 en Tucurrique de Alvarado, Costa Rica. A los 10 años del ensayo, se seleccionaron los mejores 23 árboles, con base en las mismas características indicadas para *E. deglupta*, y se recolectó su semilla para el establecimiento de un ensayo de familias F_2 . Además, se incluyó semilla de 5 árboles sobresalientes de una plantación antigua ubicada en el área conocida como Campo Gamma, dentro de la finca del CATIE, en Turrialba.

Con el establecimiento de ambos ensayos se pretendía preservar parte del recurso genético de las especies en un sitio seguro, como son los terrenos del CATIE, además de la posibilidad de convertir los ensayos en el corto plazo en huertos semilleros para la producción de semilla genéticamente superior.

En este documento se evalúan los ensayos de familias F_2 con fines de conversión en huertos semilleros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento de los ensayos

Los ensayos F_2 fueron establecidos en el área conocida como Noche Buena, dentro de la finca experimental del CATIE, en Turrialba, Costa Rica, ubicada a 9°53' latitud N, 83°38' longitud O y a una altitud de 650 msnm, dentro de la zona de vida bosque muy húmedo Premontano Tropical (Holdridge 1967). El sitio recibe una precipitación promedio anual de 2692 mm y

presenta una temperatura promedio anual de 21,8°C (CATIE 2006).

El ensayo de *E. grandis* fue plantado en octubre 2000, y el de *E. deglupta* en agosto 2001. Antes de la plantación, el sitio estaba dedicado al pastoreo, y se encontraba ocupado por vegetación natural de poáceas, unos pocos árboles de guayaba (*Psidium guajava*), y laurel (*Cordia alliodora*), principalmente. La preparación del sitio consistió de una chapea mecánica, marcación, hoyea y rodajea con pala en los puntos de siembra. También se talaron los pocos árboles presentes en el sitio. Al momento de la plantación se aplicó fertilizante de la fórmula 12-24-12 en dosis de 50 g planta⁻¹ al fondo del hoyo. Un mes después se aplicó N (Nutrán) en igual dosis alrededor de cada árbol. Posteriormente, se realizaron rodajeas y chapeas periódicas de acuerdo al crecimiento de la vegetación, aproximadamente 2 veces por año.

Diseño experimental y evaluaciones

Para ambos ensayos se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 13 bloques; parcelas lineales de 5 árboles por familia constituyeron la unidad experimental. Se utilizó un distanciamiento de 3 x 3 m, con 25 familias en el caso de *E. deglupta* y 28 familias en el caso de *E. grandis*, las cuales fueron aleatorizadas dentro de cada bloque. Además, se plantó una línea externa de borde alrededor de los ensayos. El área total de los ensayos fue de 1,6 ha para *E. deglupta* y 1,7 ha para *E. grandis*.

Se midió la altura total al año, y la altura total, el diámetro a la altura del pecho (dap) y la forma del fuste anualmente a partir del segundo año. Para evaluar la forma del fuste se utilizó una escala de 1 a 4, donde: 1=excelente, 2=bueno, 3=regular, 4=malo. Además, se anotó la presencia de cáncer del tallo en el caso de *E. grandis*, daños por un hongo no identificado que atacó la plantación de *E. deglupta* durante el 2002.

En este documento se reportan los resultados de la última evaluación realizada en marzo 2005 en *E. deglupta* y mayo 2005 en *E. gran-*

dis, cuando los ensayos tenían 3,8 y 4,4 años, respectivamente.

Al momento de la última evaluación en 2005, el ensayo de *E. grandis* había recibido 2 raleos, el primero en el 2001, para eliminar el peor árbol de cada familia dentro de cada bloque, y el segundo en el 2002 para eliminar los 2 árboles inferiores de cada familia dentro de cada bloque. El ensayo de *E. deglupta* recibió 1 único raleo en el 2003 para eliminar los 2 peores árboles de cada familia dentro de cada bloque.

Análisis de los datos

Cada una de las variables fue analizada mediante análisis de varianza (ANDEVA), seguida por pruebas de Duncan para determinar diferencias entre familias, usando el programa PROC GLM de SAS. Se realizó también un análisis de componentes de varianza, para estimar la heredabilidad en sentido estricto para las 3 variables.

El modelo usado para el análisis estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + F_j + BF_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

Y_{ijk} = el valor fenotípico del k-ésimo árbol de la j-ésima familia en el i-ésimo bloque;

μ = media poblacional;

B_i = efecto del i-ésimo bloque;

F_j = efecto de la j-ésima familia;

BF_{ij} = la interacción del i-ésimo bloque con la j-ésima familia;

ε_{ijk} = efecto residual

Con el fin de ordenar las familias de acuerdo a su desempeño combinado en dap y rectitud del fuste, se calculó un índice $I = (y_{dap} - \mu_{dap}) / \sigma_{dap} + (\mu_r - y_r) / \sigma_r$, donde y_{dap} es la media de la familia para dap; μ_{dap} es la media poblacional para dap; σ_{dap} es la desviación estándar para dap; μ_r es la media poblacional para rectitud del fuste; y_r es la media de la familia para rectitud del fuste; y σ_r es la desviación estándar para rectitud del fuste.

Esta fórmula permite la estandarización de los valores de ambas variables independientemente de sus unidades (Mesén y Cornelius 1999). En el caso de rectitud del fuste, se varió el orden de las medias en la fórmula debido a la escala utilizada, que otorga un menor puntaje a los mejores árboles.

La heredabilidad en sentido estricto a nivel de árbol individual (h^2), para las 3 variables evaluadas fue estimada mediante la fórmula $h^2 = \sigma_A^2 / (\sigma_F^2 + \sigma_{BF}^2 + \sigma_E^2)$, donde σ_A^2 es la varianza aditiva, equivalente a 2,5 σ_F^2 ; σ_F^2 es la varianza debida a las familias; σ_{BF}^2 es la varianza debida a la interacción de bloques y familias; y σ_E^2 es la varianza residual (árboles dentro de familias en cada bloque) (Cotterill 1987, Zobel y Talbert 1984). Para el cálculo de la varianza aditiva se utilizó un multiplicador de 2,5, asumiendo un coeficiente de relación entre medios hermanos de 0,4, basado en una tasa promedio

de alo cruzamiento de 70% para estas especies (Cornelius *et al.* 1995).

El coeficiente de variación genética aditiva (CVGA) fue calculado mediante la fórmula $CVGA=100 (\sigma_A/\mu)$, donde σ_A es la desviación estándar genética aditiva y μ es la media poblacional (Houle 1992).

La ganancia genética estimada (G%) fue calculada mediante la fórmula $G\%=(i)CVGA(h)$, donde i =intensidad de selección y $h=\sqrt{h^2}$. Los valores de i fueron obtenidos de Falconer (1981).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eucalyptus deglupta

Se encontró diferencias altamente significativas entre familias para las 3 variables evaluadas (Cuadro 1). El promedio poblacional fue

Cuadro 1. Resumen de resultados del ANDEVA para el ensayo de familias de *E. deglupta*, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	Componentes de varianza	F	P>F
Altura					
Bloques (B)	12	49,797	0,854	5,35	<0,0001
Familias (F)	24	31,578	0,807	3,39	<0,0001
B x F	286	9,305	2,937	2,67	<0,0001
Residual	379	3,489	3,272		
Dap					
Bloques (B)	12	46,400	0,547	2,65	0,0022
Familias (F)	24	61,235	1,598	3,50	<0,0001
B x P	286	17,478	4,062	2,00	<0,0001
Residual	379	8,727	8,744		
Rectitud					
Bloques (B)	12	0,344	0	0,39	0,9679
Familias (F)	24	1,916	0,029	2,15	0,0018
B x F	286	0,891	0,102	1,35	0,0033
Residual	379	0,661	0,670		

de 14,6 m para altura y 13,4 cm para dap, lo que equivale a incrementos medios anuales (IMA) de 3,8 m y 3,5 cm, respectivamente, mientras que la mejor familia presentó IMA de 4,3 m en altura y 4,3 cm en dap.

En plantaciones de hasta 7 años en Costa Rica, se reporta que el IMA en altura fluctúa entre 1,1 y 4,9 m, y el IMA en dap entre 0,7 y 4,5 cm (CATIE 1994). Se estima que crecimientos en altura superiores a 3,5 m año⁻¹ se logran en suelos profundos, bien drenados y de textura liviana, de manera que el crecimiento promedio de 3,8 m (máximo de 4,3 m), obtenido en este sitio de suelos sobrepastoreados, puede ser un reflejo de la mejor calidad genética de este material de segunda generación de selección.

Se presentó una amplia variación entre familias en cada una de las 3 variables. En altura, la diferencia entre la mejor (15) y la peor familia (18) fue de 41%. En cuanto a dap, la diferencia entre la mejor (8) y la peor familia (18) fue de 48,6%, y para rectitud del fuste, la diferencia entre la mejor (24) y la peor (20) fue de 49,3%. Coincidentemente, las 5 familias inferiores para dap fueron también las que presentaron peor forma, y 4 de estas también resultaron inferiores en altura (Cuadro 2). Este grupo de familias inferiores se resalta con gris en el cuadro 2.

Cuando se aplicó el índice combinado para dap y rectitud del fuste, un 44% de las familias presentó un índice positivo, *i.e.* superiores para ambas características. Como era de esperar, las mismas 5 familias inferiores para dap y forma separadamente (códigos 2, 11, 17, 18 y 20) resultaron también inferiores para el índice combinado (Cuadro 3).

Los parámetros poblacionales y genéticos se muestran en el cuadro 4, incluyendo estimaciones de ganancia genética (G). Los valores de h^2 para altura (0,29) y dap (0,28) fueron muy similares a los reportados por Cornelius (1994), quien obtuvo valores promedio de 0,28 y 0,23, respectivamente, en una revisión de 67 estudios. La h^2 para altura está cercana al rango de 0,15 a 0,27 para esta característica a los 16 meses en 3 sitios, reportados por Cornelius *et al.* (1995) para

el ensayo F₁ de *E. deglupta*, de donde fueron seleccionados los árboles plus para el presente ensayo. La heredabilidad para rectitud del fuste fue baja (0,09), considerando que normalmente se espera una mayor heredabilidad para este tipo de características de tipo cualitativo (Zobel y Talbert 1984). Esto puede tener su explicación en el ataque por el hongo que sufrió esta plantación durante sus primeros años, el cual dañó el brote apical y en consecuencia afectó severamente la forma del fuste. Por lo tanto, es probable que la forma actual de los árboles en el ensayo sea el reflejo de este factor externo, asociado más a genes de susceptibilidad de los árboles al hongo que a los genes responsables de la rectitud del fuste. En este caso, la selección de los árboles con mejor forma del fuste posiblemente favorezca tanto a los árboles menos susceptibles al hongo como a los que mejor se recuperaron del ataque.

Los valores de CVGA encontrados están dentro de lo normal para este tipo de ensayos. Por ejemplo, Cornelius *et al.* (1995), en el ensayo F₁ de *E. deglupta* mencionado anteriormente, encontraron valores de CVGA para altura a los 16 meses de 16,2, 14,6 y 19,5% para 3 sitios. Navarro y Hernández (2004) reportaron valores de 13 y 14% para altura y dap, respectivamente, en familias de *Swietenia macrophylla*. Mientras que Navarro *et al.* (2004) informaron valores de 10,7 y 21,4% para altura y dap en ensayos de procedencias/progenies de *Cedrela odorata*. En el presente estudio, los valores de CVGA de 9,72, 14,89 y 10,59% para altura, dap y rectitud del fuste, respectivamente, indican la existencia de variación genética aditiva disponible para selección y mejoramiento para las 3 características. Sin embargo, la baja heredabilidad registrada para rectitud del fuste, como se discutió, limita la obtención de ganancias genéticas importantes para esta característica.

Eucalyptus grandis

Se encontró diferencias altamente significativas entre familias para las 3 variables evaluadas (Cuadro 5). El promedio general fue

Cuadro 2. Promedios de altura, dap y rectitud del fuste para las 25 familias de *E. deglupta* a los 3,8 años en Turrialba, Costa Rica.

Familia	Altura promedio (m)	Familia	Dap promedio (cm)	Familia	Rectitud del fuste**
15	16,5 a*	8	16,2 a	24	2,25 a
3	16,3 ab	15	15,8 a	15	2,27 a
8	16,2 ab	21	15,6 ab	21	2,32 a
21	16,1 abc	3	15,6 ab	3	2,36 a
19	15,5 abcd	25	15,3 abc	14	2,37 a
12	15,3 abcd	24	14,7 abcd	4	2,37 a
10	15,3 abcd	10	14,5 abcd	8	2,39 a
25	15,2 abcd	19	14,4 abcde	10	2,42 a
9	15,0 abcd	12	14,2 abcde	19	2,43 a
7	14,7 abcde	9	13,9 bcdef	23	2,45 a
20	14,7 abcde	7	13,2 bcdefg	16	2,45 a
24	14,7 abcde	16	12,9 cdefg	7	2,47 a
23	14,7 abcde	23	12,8 cdefg	25	2,48 a
4	14,6 bcde	4	12,8 cdefg	6	2,48 a
16	14,5 bcde	22	12,7 cdefg	12	2,52 a
1	14,2 cde	13	12,6 defg	22	2,55 a
22	14,0 de	6	12,6 defg	13	2,59 ab
5	14,0 de	5	12,6 defg	5	2,64 ab
6	14,0 de	1	12,5 defg	1	2,64 ab
13	14,0 de	14	12,3 defg	9	2,70 ab
11	13,6 de	20	12,1 defg	11	2,74 ab
14	13,6 de	17	11,8 efg	17	2,83abc
17	13,5 de	11	11,3 fg	18	2,88abc
2	12,9 ef	2	11,2 fg	2	3,14 bc
18	11,7 f	18	10,9 g	20	3,36 c

*Familias con la misma letra no son estadísticamente diferentes según la prueba de Duncan, $p=0,05$.

**escala de 1 a 4 donde 1=excelente, 2=bueno, 3=regular, 4=malo.

de 21,6 m para altura y 20,1 cm para dap, lo que equivale a un IMA de 4,9 m y 4,5 cm, respectivamente. El IMA para la mejor familia fue de 5,3 m en altura y 6,1 cm en dap, lo que muestra el potencial de crecimiento de esta especie.

En plantaciones menores de 7 años, establecidas a 3 x 3 m en Turrialba, Vásquez y Navarro (1993) reportaron valores de IMA en altura de 3,2 a 5,1 m, y de 3,2 a 4,7 cm en dap, de manera que el crecimiento promedio de los árboles de este

Cuadro 3. Ordenamiento de las familias de *E. deglupta* de acuerdo con el índice combinado para dap y rectitud del fuste.

Familia	Índice	Familia	Índice
15	0,93	16	-0,03
8	0,90	9	-0,05
21	0,82	23	-0,05
3	0,77	6	-0,14
24	0,67	22	-0,19
25	0,57	13	-0,26
10	0,43	5	-0,32
19	0,38	1	-0,34
12	0,23	14	-0,49
4	0,04	17	-0,73
7	0,03	11	-0,76
		18	-1,03
		2	-1,24
		20	-1,26

ensayo se ubica cerca de los máximos reportados para la zona. En el caso de la mejor familia del ensayo, el IMA de 6,1 cm en dap es muy superior al rango reportado por dichos autores.

En un ensayo de especies y procedencias de *Eucalyptus* spp. establecido en 1980 en el

CATIE, Turrialba, a los 5 años las procedencias de *E. grandis* fueron superiores a otras 21 procedencias de 7 especies, con incrementos medios anuales en altura de 3,8 m y de 2,8-3,3 cm en dap (Mesén 1990). Los promedios de 4,9 m en altura y 4,5 cm en dap obtenidos en el presente ensayo demuestran las ganancias en crecimiento logradas desde esos primeros ensayos de procedencias.

El comportamiento de los árboles de este ensayo es incluso comparable al reportado por Endo y Wright (1992) para plantaciones fertilizadas, originadas con semilla de fuentes semilleras seleccionadas por la empresa Cartón de Colombia, que presentaron crecimientos de 3,9-6 m en altura y de 4,1-5,6 cm en dap.

Los datos de rectitud del fuste y crecimiento obtenidos en el presente ensayo parecen indicar la efectividad del proceso de selección y mejoramiento llevado a cabo con esta especie.

Se registró una amplia variación entre familias para dap y rectitud, y menor para altura. En dap, la diferencia entre la mejor (6) y la peor familia (26) fue de 58%. En rectitud, la diferencia entre la mejor (5) y la peor familia (13) fue de 72%, mientras que en altura, esta diferencia fue de tan solo 18%. Esto indica la existencia de una amplia gama de variación fenotípica en el ensayo, particularmente para las 2 primeras variables, y altas posibilidades de selección. Un grupo de 4 familias (códigos 1, 13, 24 y 26) resultaron

Cuadro 4. Parámetros poblacionales y genéticos para las familias de *E. deglupta*.

Variable	μ	σ	σ^2_F	σ^2_A	CVGA	h^2	G%
Altura	14,6	2,79	0,807	2,016	9,72	0,29	6,04
Dap	13,4	3,85	1,598	3,995	14,89	0,28	9,10
Rectitud	2,6	0,89	0,029	0,073	10,59	0,09	3,69

μ = media poblacional

σ = desviación estándar fenotípica

σ^2_F = varianza debida a las familias

σ^2_A = varianza genética aditiva

CVGA = coeficiente de variación genética aditiva

h^2 = heredabilidad

G%= porcentaje de ganancia genética

Cuadro 5. Resumen de resultados del ANDEVA para el ensayo de familias de *E. grandis*, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	Componentes de varianza	F	P>F
Altura					
Bloques (B)	12	202,719	3,729	19,45	<0,0001
Familias (F)	27	21,360	0,432	2,05	0,0020
B x F	317	10,421	2,335	2,34	<0,0001
Residual	310	4,452	5,387		
Dap					
Bloques (B)	12	355,345	6,409	11,24	<0,0001
Familias (F)	27	79,759	2,383	2,52	<0,0001
B x F	317	31,602	2,322	1,11	0,1846
Residual	310	28,548	28,080		
Rectitud					
Bloques (B)	12	1,465	0,014	2,34	0,0069
Familias (F)	27	2,276	0,066	3,64	<0,0001
B x F	317	0,625	0,027	1,15	0,1106
Residual	310	0,545	0,561		

claramente inferiores para todas las variables, mientras que otras 2 (16 y 19) resultaron inferiores para 1 ó 2 de las variables; la familia 16, aunque no está entre el grupo inferior en rectitud, ocupó la última posición en altura y estuvo entre las 5 peores en dap, mientras que la 19 se ubicó en posiciones intermedias en altura y dap pero ocupó la penúltima posición en cuanto a rectitud del fuste (Cuadro 6). Las familias inferiores son resaltadas en gris en el cuadro 6.

Cuando se aplicó el índice combinado para dap y rectitud del fuste, un 54% de las familias presentó un índice positivo, indicando la superioridad de este ensayo para estas 2 variables en comparación con el ensayo de *E. deglupta* (44% con índice positivo), lo cual concuerda con lo que se observa en el campo. Por lo general, se espera que este índice separe aproximadamente el 50% de las familias. Al utilizar el índice combinado se identifica más claramente el grupo de familias

inferiores, que en este caso incluye las familias 1, 13, 16, 19, 24 y 26 (Cuadro 7). Estas familias se resaltan en gris en el cuadro 7.

Los parámetros poblacionales y genéticos, incluyendo estimaciones de ganancia (G), se muestran en el cuadro 8. Los valores de heredabilidad para este ensayo también se encuentran dentro del rango normal para este tipo de variables, como se discutió anteriormente. En este caso, resaltan los altos valores de h^2 y CVGA para rectitud del fuste, que concuerdan con lo esperado para variables cualitativas, que normalmente se encuentran bajo un fuerte control genético aditivo (Zobel y Talbert 1984). Este ensayo no ha sido afectado severamente por causas externas, como ocurrió con el ensayo de *E. deglupta*; por lo tanto, las diferencias observadas entre familias para rectitud del fuste posiblemente se deban a su potencial genético y no tanto a factores ambientales. Estos valores, junto a la desviación estándar fenotípica

Cuadro 6. Promedios de altura, dap y rectitud del fuste para 28 familias de *E. grandis* a los 4,4 años en Turrialba, Costa Rica.

Familia	Altura promedio (m)	Familia	Dap promedio (cm)	Familia	Rectitud del fuste**
21	23,5 a*	6	27,0 a	5	1,50 a
5	23,1 ab	21	23,3 b	9	1,58 ab
7	22,9 abc	3	22,2 bc	22	1,65 abc
6	22,8 abc	5	22,0 bcd	6	1,67 abc
25	22,7 abcd	25	21,3 bcde	20	1,68 abc
27	22,6 abcd	11	21,1 bcdef	4	1,78 abcd
18	22,3 abcde	4	21,1 bcdef	7	1,81 abcde
3	22,1 abcdef	14	21,0 bcdef	11	1,84 abcde
22	22,1 abcdef	22	20,7 bcdef	28	1,84 abcde
17	22,1 abcdef	27	20,6 bcdef	25	1,86 abcde
11	22,1 abcdef	12	20,5 bcdef	27	1,88 abcde
4	21,9 abcdef	9	20,3 bcdef	14	1,92 abcdef
12	21,9 abcdef	7	20,2 bcdef	23	1,92 abcdef
20	21,8 abcdef	20	20,2 bcdef	17	1,96 abcdefg
2	21,7 abcdef	17	20,1 bcdef	21	2,00 abcdefgh
9	21,5 abcdef	19	19,8 bcdef	18	2,08 bcdefghi
19	21,5 abcdef	8	19,6 bcdef	10	2,14 cdefghi
14	21,2 bcdef	23	19,5 bcdef	15	2,17 cdefghi
8	21,2 bcdef	18	19,2 cdef	3	2,21 cdefghi
28	21,0 bcdef	10	18,9 cdef	16	2,25 defghi
23	20,9 bcdef	15	18,9 cdef	12	2,25 defghi
15	20,8 cdef	2	18,7 cdef	2	2,25 defghi
10	20,8 cdef	28	18,6 cdef	8	2,33 defghi
13	20,6 cdef	16	18,2 cdef	1	2,36 efghi
1	20,5 def	13	18,0 def	24	2,43 fghi
24	20,2 ef	24	18,0 ef	26	2,48 ghi
26	20,1 ef	1	17,7 ef	19	2,52 hi
16	19,9 f	26	17,1 f	13	2,58 i

*Familias con la misma letra no son estadísticamente diferentes según la prueba de Duncan, p=0,05.

**escala de 1 a 4 donde 1=excelente, 2=bueno, 3=regular, 4=malo.

alta en relación con la media poblacional, indican el amplio potencial del ensayo para selección y mejoramiento por esta característica.

La baja desviación estándar fenotípica para altura en relación con la media, incidieron en la ganancia genética, relativamente baja, estimada para esta característica (1,7%). En términos prácticos, esto significa que la selección por altura no tendría mayor influencia y que la selección para fines de raleo genético debería concentrarse principalmente en rectitud del fuste y dap, en ese orden.

Implicaciones prácticas

Uno de los objetivos centrales de estos ensayos es su conversión en huertos semilleros para la producción de semilla genéticamente superior. Para tal efecto, ciertamente existe la tentación de eliminar todas las familias con índices negativos, lo cual aumentaría grandemente la ganancia genética; pero a expensas de una severa reducción de la base genética de los huertos. Un mejor balance entre reducción de la base genética y ganancia, podría lograrse eliminando solamente las 5 familias inferiores de *E. deglupta* (2, 11, 17, 18 y 20) y las 6 inferiores de *E. grandis* (1, 13, 16, 19, 24 y 26), con la salvedad de mantener árboles de forma 1 que pudieran aparecer en estas familias. Estos árboles tienen el mérito de poseer buenas características a pesar de pertenecer a familias de promedio inferior, lo cual les confiere

Cuadro 7. Ordenamiento de las familias de *E. grandis* de acuerdo con el índice combinado para dap y rectitud del fuste.

Familia	Índice	Familia	Índice
6	1,53	12	-0,21
5	0,95	18	-0,21
9	0,58	10	-0,32
21	0,55	15	-0,37
22	0,55	8	-0,46
4	0,45	28	-0,48
20	0,44	2	-0,50
25	0,40	16	-0,58
11	0,38	19	-0,65
7	0,28	1	-0,79
14	0,27	24	-0,83
27	0,25	13	-1,01
3	0,11	26	-1,04
17	0,08		
23	0,03		

potencial para selecciones futuras. Igualmente, se recomienda la eliminación de todos los árboles de forma 3 y 4, independientemente de la familia a la que pertenecen, o de si quedan o no otros árboles de la misma familia en el bloque. Esto

Cuadro 8. Parámetros poblacionales y genéticos para las familias de *E. grandis*.

Variable	μ	σ	σ^2_F	σ^2_A	CVGA	h^2	G%
Altura	21,63	3,40	0,43	1,08	4,81	0,13	1,7
Dap	20,14	6,21	2,38	5,96	12,12	0,18	5,0
Rectitud	2,03	0,82	0,07	0,16	19,93	0,25	9,7

μ = media poblacional

σ = desviación estándar fenotípica

σ^2_F = varianza debida a las familias

σ^2_A = varianza genética aditiva

CVGA = coeficiente de variación genética aditiva

h^2 = heredabilidad

G% = porcentaje de ganancia genética

permitirá elevar la calidad genética del huerto, aunque en ocasiones genere claros grandes en la plantación. Es preferible aceptar estos claros que la contaminación genética de estos árboles inferiores dejados solo por aspectos de distribución. Esta eliminación podría realizarse en una sola intervención, y debe incluir también la línea de borde. En un siguiente raleo, 1 ó 2 años después, se sugiere dejar únicamente el mejor árbol por familia en cada uno de los bloques, seleccionado con base en rectitud del fuste y dap. Se sugiere realizar el raleo en 2 etapas con al menos 1 año de diferencia entre ambas intervenciones, para evitar abrir claros en forma abrupta en la plantación, que pudieran favorecer el volcamiento de los árboles remanentes y el excesivo crecimiento de malezas. Después del raleo, en el huerto de *E. deglupta* quedarán 220 árboles, equivalente a 150 árboles ha⁻¹, y en el de *E. grandis* quedarán 304 árboles, equivalente a 187 árboles ha⁻¹. Estas densidades están dentro, o muy cercanas, al rango de 140 a 160 árboles ha⁻¹ que se estima deben quedar después del raleo final de los ensayos de familias de especies tropicales (Mesén 1997).

La aplicación de estas recomendaciones, resultaría en intensidades de selección de 1,16 para *E. deglupta* (i.e. selección de un 30% de la población) y de 0,97 para *E. grandis* (i.e. selección de un 40% de la población).

En términos prácticos, la ganancia genética indica el porcentaje de superioridad que podría obtenerse en plantaciones originadas con semilla del huerto ya raleado, establecidas en sitios similares, cuando dichas plantaciones alcancen la edad actual del ensayo. Es decir, se esperaría que las futuras plantaciones, establecidas con semilla del huerto de *E. deglupta*, a los 3,8 años alcancen promedios de 2,5 en rectitud, 14,7 cm en dap y 15,5 m en altura, en comparación con los promedios actuales del ensayo de 2,6, 13,4 cm y 14,6 m, respectivamente.

En el caso de *E. grandis* se esperaría que una plantación originada con semilla de este huerto raleado, en un sitio similar y a la edad de 4,4 años, muestre una rectitud promedio de 1,8, un dap de 21,1 cm y una altura de 22,0 m,

en comparación con los valores actuales de 2,0, 20,1 cm y 21,6 m, respectivamente. Estas diferencias, que pueden parecer pequeñas a nivel individual, representan grandes ganancias cuando se convierten en volumen por hectárea. Se debe enfatizar también que estas son posibles ganancias, obtenidas mediante el uso de semilla de los huertos raleados, en comparación con los promedios de los ensayos antes del raleo, que ya de por sí representan una segunda generación de selección y mostraron tasas de crecimiento altas. Las ganancias serían mucho mayores en comparación con plantaciones de material no mejorado, como el que se utiliza en la actualidad en Costa Rica. Además, las ganancias en la tasa de crecimiento y mejor forma de los árboles traen consigo otros beneficios de importancia económica considerable, como son las reducciones en los costos iniciales de mantenimiento debido a un cierre más temprano de copas, mayor facilidad de transporte y mayores índices de aprovechamiento en aserrío de árboles de mejor forma. Así como un retorno más rápido de la inversión, como resultado de una reducción en los turnos de rotación.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Jonathan Cornelius (ICRAF/Perú) por sus valiosos comentarios y correcciones al borrador, al Lic. Gustavo López (CATIE) por su ayuda en el análisis estadístico y al Sr. Marvin Hernández (CATIE) por su apoyo en los trabajos de campo.

LITERATURA CITADA

- CAB International. 2000. Forestry compendium global module. Wallingford, UK: CAB International.
- CATIE. 1994. Deglupta (*Eucalyptus deglupta*), especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica, Informe Técnico No. 240. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 45 p.
- CATIE. 2006. Datos meteorológicos. CATIE, Turrialba, Cartago, Costa Rica. www.catie.ac.cr/Bancoconocimiento/D/Datos_meteorologicos_2005.

- CORNELIUS J.P. 1994. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. *Canadian Journal of Forest Research* 24(2):372-379.
- CORNELIUS J.P., COREA A.E., MESÉN F. 1995. Genetic variation in height growth and leaf colour of *Eucalyptus deglupta* Blume at ages up to 16 months in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 75:49-59.
- COTTERILL P.P. 1987. Short note: on estimating heritability according to practical applications. *Silvae Genetica* 36:46-48.
- ENDO M., WRIGHT J.A. 1992. Growth of *Eucalyptus grandis* plantation under different levels of competing vegetation control. Smurfit Cartón de Colombia, Investigación Forestal . Research Report No. 148.
- FALCONER D.S. 1981. Introduction to quantitative genetics. 2nd ed. The Pitman Press, Great Britain. 340 p.
- HOLDRIDGE L.R. 1967. Life zone ecology. Rev. Ed. San José, Costa Rica. Tropical Science Center.
- HOULE D. 1992. Comparing evolvability and variability of quantitative traits. *Genetics* 130: 195-204.
- MESÉN F. 1990. Resultados de ensayos de procedencias en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie Técnica, Informe Técnico N°. 156. 42 p.
- MESÉN F. 1996. Huertos semilleros de plántulas. I. Opción de producción de semilla mejorada para pequeñas organizaciones forestales. *Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales* 14:13-17.
- MESÉN F. 1997. Huertos semilleros de plántulas. *Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales* 16:20-22.
- MESÉN F., CORNELIUS J.P. 1999. Evaluación de un ensayo de procedencias/familias de *Vochysia guatemalensis* en Turrialba, Costa Rica, a los ocho años de edad con fines de conversión en huerto semillero, pp. 73-78. *In* Memorias, Salazar (ed). II Simposio sobre Avances en la Producción de Semillas Forestales en América Latina, Santo Domingo, República Dominicana, PROSEFOR, CATIE.
- MESÉN F. 2002. Estado de los recursos genéticos forestales en Cuba, México y América Central, y plan de acción regional para su conservación y uso sostenible. Informe de Consultoría, preparado para el Taller Subregional FAO, 25-29 noviembre 2002, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 101 p.
- NAVARRO C., HERNÁNDEZ G. 2004. Progeny test analysis and population differentiation of mesoamerican mahogany (*Swietenia macrophylla*). *Agronomía Costarricense* 28(2):37-51.
- NAVARRO C., MONTAGNINI F., HERNÁNDEZ G. 2004. Genetic variability of *Cedrela odorata* Linnaeus: results of early performance of provenances and families from Mesoamerica grown in association with coffee. *Forest Ecology and Management* 192:217-227.
- VÁSQUEZ W., NAVARRO C. 1993. Ensayo de espaciamiento en arreglo sistemático Nelder para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* B&G y *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden en Turrialba, Costa Rica. *Silvoenergía* 52:1-4.
- ZOBEL B., TALBERT J. 1984. Técnicas de mejoramiento genético de árboles tropicales. Limusa, México. 545 p.