

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFICIENCIA DE SELECCIÓN TEMPRANA POR CRECIMIENTO
EN DOS POBLACIONES DE MEDIOS HERMANOS DE *Eucalyptus*
grandis Hill ex Maiden

por

Paola Nahir MOLINA LEÓN

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magister en Ciencias Agrarias, opción
Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO

URUGUAY

Diciembre, 2017

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Agr. (PhD) Guillermo Galván, la Ing. Agr. (PhD) Ana Espasandín y el Ing. Agr. (PhD) Gustavo Balmelli, el veintidós de diciembre de 2017. Autora: Ing. Ftal. Paola Molina. Director Ing. Agr. (PhD) Ariel Castro, Co-director Ing. Agr. (PhD) Jorge Franco.

Dedico este trabajo a mi familia...

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme alcanzar esta meta.

A toda mi familia, especialmente a mi madre Lidia León por ser mi pilar a pesar de la distancia.

A Robert Purnell y Juan Pedro Posse por la guía y el apoyo que me brindaron a lo largo de este trabajo.

A mis tutores, Ariel Castro y Jorge Franco, por sus orientaciones, consejos, apoyo y paciencia.

A mis compañeros Juliana Ivanchenko y Gerardo Osorio, gracias a ellos estos ensayos fueron instalados, mantenidos y medidos.

A la empresa Weyerhaeuser Productos S.A./Lumin® por darme la oportunidad de seguir capacitándome y por financiar todos los gastos que implicó este estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 CONTENIDO DEL TRABAJO.....	4
2. <u>EFICIENCIA DE SELECCIÓN TEMPRANA POR CRECIMIENTO EN DOS POBLACIONES DE MEDIOS HERMANOS DE <i>Eucalyptus</i> <i>grandis</i> Hill ex Maiden.</u>	5
2.1 RESUMEN.....	5
2.2 SUMMARY.....	6
2.3 INTRODUCCIÓN.....	7
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.4.1 <u>Material evaluado</u>	8
2.4.2 <u>Análisis de datos</u>	9
2.5 RESULTADOS.....	13
2.5.1 <u>Descripción general de los ensayos</u>	13
2.5.2 <u>Interacción genotipo por ambiente</u>	15
2.5.3 <u>Parámetros genéticos</u>	15
2.5.4 <u>Correlación edad-edad y variable-variable</u>	16
2.5.5 <u>Ganancia genética y eficiencia de selección</u>	20
2.5.6 <u>Simulación de selección</u>	24
2.6 DISCUSIÓN.....	34
2.7 AGRADECIMIENTOS.....	37

2.8 BIBLIOGRAFÍA.....	37
3. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GENERALES</u>	41
4. <u>BIBLIOGRAFÍA GENERAL</u>	42

RESUMEN

La reducción del tiempo requerido para cada ciclo de mejoramiento genético forestal es una de las estrategias para aumentar las ganancias genéticas. El objetivo del trabajo fue estimar la eficiencia de selección temprana en familias de medios hermanos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden seleccionadas previo al año 5 en base al diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (HT) y volumen cilíndrico (VOL) dentro de un programa de mejoramiento genético para madera sólida. Los ensayos de progenie, agrupados en dos poblaciones según la fuente de semilla (Población 1, Universidad de Florida y Población 2, Pomera Maderas S.A.), fueron plantados en el año 2009 en los departamentos de Tacuarembó y Cerro Largo, con diseño de bloques completos al azar (BCA) y parcela individual (STP). Se identificó interacción genotipo por ambiente solamente para la Población 2 para DAP y VOL. Las heredabilidades medias fueron crecientes al acercarse al año 5, DAP 0,21 a 0,36, HT 0,42 a 0,54 y VOL 0,20 a 0,36. Las correlaciones edad x -edad5 fueron altas ($> 0,70$) a partir del año 3. El DAP fue la variable que presentó mejor correlación con el VOL ($> 0,60$) a partir del año 3. La eficiencia de selección (E) fue mayor en los años 3 y 4 para cada variable. Los parámetros genéticos, los porcentajes de G/año y la E para DAP, HT y VOL presentaron comportamientos similares dentro de cada ensayo y variaciones entre ensayos, las cuales indican el potencial de selección temprana previa al año 5 en poblaciones de *E. grandis*, y acortar el tiempo de la fase de evaluación del material a fin de reducir el ciclo de mejora.

Palabras claves: parámetros genéticos, polinización abierta, correlación edad-edad, intensidad de selección.

Early Selection Efficiency for Growth in two Half-sib Population of *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden

SUMMARY

Reducing the cycle time of breeding programs is one strategy to increase genetic gains. The objective of the study was to estimate the efficiency of early selection in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden half-sib families selected prior to age 5 years based on diameter at breast height (DBH), total height (HT) and volume (VOL) in a solid wood genetic improvement program. Progeny trials, grouped in two populations according to the seed source (Population 1, University of Florida and Population 2, Pomera Maderas S.A.), were planted in 2009 in the departments of Tacuarembó and Cerro Largo, Uruguay, with randomized complete block design (RCB) and single tree plots (STP). Genotype by environment interaction was identified in Population 2 for DAP and VOL. Mean heritability increased as they approached year 5, DAP 0.21 to 0.36, HT 0.42 to 0.54 and VOL 0.20 to 0.36. Age-age correlations were high (> 0.70) from year 3. DAP was the variable that presented the highest correlation with VOL (> 0.60) from year 3. The selection efficiency (E) was higher in years 3 and 4, depending upon trait. Genetic parameters, percentages of G/year and E for DAP, HT and VOL showed similar behaviors within each trial and variations between trials which indicate the potential for early selection prior to year 5 in populations of *E. grandis* and shorten the time of the evaluation phase to reduce cycle of improvement.

Key words: genetic parameters, open pollination, age-age correlation, selection intensity.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden es utilizado ampliamente en América del Sur, siendo una de las especies de mayor importancia en el sector forestal uruguayo (Boscana y Boragno, 2017, FAO, 2006). Las introducciones del *E. grandis* a fin de iniciar y desarrollar programas de mejoramiento genético forestal en Uruguay se iniciaron a mediados de la década del 60. Estas primeras introducciones fueron realizadas por el Departamento Forestal de la Universidad de la República y la Dirección Forestal. En estas primeras introducciones el germoplasma provino de huertos semilleros de Sudáfrica, los ensayos fueron instalados en la actual Estación Experimental Bernardo Rosengurtt, Cerro Largo. A partir de la década de los 90, se generó un cambio sobre la visión de la importancia estratégica del uso de semilla de calidad, que generó nuevas introducciones y el emprendimiento de programas de mejora genética a nivel nacional (Andreoni y Bussoni, 2014, Balmelli, 2001, Bennadji, 2001, Bennadji y Uetsuki, 2001, Brussa, 1994).

La selección de material superior es el centro de un ciclo de mejoramiento genético, en el cual el objetivo principal es obtener ganancias genéticas en el menor tiempo, manteniendo una base genética adecuada para el mejoramiento a largo plazo y conservación de genes (White et al., 2007). La selección temprana ha sido un tema muy importante en la mayoría de los programas de mejoramiento genético, debido al tiempo prolongado que conllevan las evaluaciones genéticas, especialmente si la comparamos con cultivos agrícolas (Myburg et al., 2007, Wu, 1998). La fase de evaluación de un material de *E. grandis*, varía entre 7 y 10 años, mientras que se necesitan entre 14 y 21 años para la obtención de clones para plantaciones comerciales (Moraes et al., 2014, Fonseca et al., 2010, Pereira et al., 1997). La reducción de la fase de prueba (evaluación) es esencial en el mejoramiento genético para maximizar las ganancias genéticas por unidad de tiempo, y que a su vez estas ganancias genéticas permitan justificar los gastos asociados con el mejoramiento de árboles (White et al., 2007, Borralho et al., 1992).

Las ventajas principales de la selección temprana en árboles (Moraes et al., 2014, Wu, 1998, Lambeth, 1980) son: (1) permite aumentar la intensidad de selección o reducir el tamaño de los ensayos de campo, (2) menor intervalo generacional, que también se ve reflejado en menores costos dentro del programa, (3) información genética de evaluaciones tempranas pueden ser usadas para mejorar la eficiencia de selección a la edad madura, (4) facilidad de medición, y (5) permite adaptarse más rápidamente a las nuevas necesidades de producción o de nuevas prácticas silviculturales.

La eficiencia de la selección temprana puede ser cuantificada por medio de las correlaciones genéticas edad-edad, en el cual se utilizan datos de ensayos de campo existentes para observar relaciones de crecimiento en edades tempranas y posteriores en los mismos árboles, se cuantifica en términos de ganancias genéticas (Wu, 1998). La presencia de una alta correlación juvenil-adulto es uno de los factores más importantes para lograr una selección temprana esta eficiente (Borrallho et al., 1992).

Estudios previos han demostrado que las correlaciones genéticas entre características de crecimiento a los 32 y 56 meses para *E. grandis* fueron altas (r_G entre 0.67 y 0.92), sugiriendo que es posible realizar la selección por crecimiento al tercer año de evaluación (Balmelli, 2001). Se menciona también, que el crecimiento al año tiene moderada correlación con el quinto año (r_G entre 0,58 y 0,76) por lo que teóricamente podría seleccionarse a dicha edad. En ese caso, sin embargo, las ganancias genéticas serían menores que seleccionando al tercer año (Balmelli y Kubota, 2002, Balmelli, 2001).

Las estimaciones de correlación genética entre diferentes características son un indicador de la eficiencia de la selección indirecta y también indican el efecto que tiene el seleccionar por una característica sobre otra. Las correlaciones genéticas entre características de crecimiento (diámetro a la altura del pecho (DAP), altura y volumen) son muy altas para una edad determinada, indicando que es posible realizar selección indirecta para volumen. El volumen por árbol y el DAP tienen similares

niveles de control genético y están altamente correlacionados, sugiriendo que después del tercer año el DAP puede ser usado como criterio de selección, siendo una clara oportunidad para reducir costos y tiempo, sin sacrificar ganancias por volumen (Balmelli, 2001).

1.2 OBJETIVO GENERAL

Estimar la eficiencia de selección temprana por crecimiento y sus componentes en dos poblaciones de medios hermanos de *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden.

Hipótesis: Existe una dependencia interanual del crecimiento (volumen, VOL) y sus componentes (diámetro a la altura del pecho, DAP y altura total, HT) en el intervalo de dos a cinco años, que permite realizar una selección temprana en poblaciones de medios hermanos de *E. grandis* previa a los cinco años.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo específico 1: Estimar los parámetros genéticos y la interacción genotipo por ambiente para las familias de medios hermanos de ambas poblaciones.

Hipótesis: Existe interacción genotipo por ambiente para las variables y las poblaciones estudiadas, y ésta afecta la respuesta a la selección.

Objetivo específico 2: Estimar las correlaciones genéticas año a año entre año 2 y año 5 en las familias de medios hermanos de ambas poblaciones para las variables DAP, HT y VOL.

Hipótesis: Existen correlaciones genéticas entre DAP, HT y VOL a los 2, 3, 4 y 5 años de edad que permitiría una selección previa a los cinco años.

Objetivo específico 3: Identificar la mejor edad de selección en poblaciones jóvenes (menores de 5 años), en base al crecimiento y sus componentes.

Hipótesis: Es posible seleccionar en poblaciones de medios hermanos en edades previas a los cinco años en base al crecimiento y sus componentes.

Objetivo específico 4: Identificar las mejores familias de medios hermanos dentro de cada población, en base al crecimiento y sus componentes.

Hipótesis: Es posible identificar tempranamente las mejores familias de medios hermanos en base al crecimiento y sus componentes, y se espera que esa superioridad se mantenga en años posteriores.

1.4 CONTENIDO DEL TRABAJO

Este trabajo presenta un artículo a ser enviado para revisión a la revista “Agrociencia Uruguay”, por ese motivo el formato es el exigido por la revista citada en idioma español.

2. EFICIENCIA DE SELECCIÓN TEMPRANA POR CRECIMIENTO EN POBLACIONES DE MEDIOS HERMANOS DE *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden

Molina, Paola¹, Franco, Jorge², Castro, Ariel³

¹Maestría en Ciencias Agrarias opción Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Garzón 810, 12900, Montevideo, Uruguay. paolamleon@gmail.com

²Departamento de Biometría, Estadística y Computación, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Estación Experimental Mario Cassinoni, Ruta 3 km 363, 60000, Paysandú, Uruguay.

³Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Estación Experimental Mario Cassinoni, Ruta 3 km 363, 60000, Paysandú, Uruguay.

2.1 RESUMEN

La reducción de tiempo en cada ciclo de mejoramiento genético forestal es una de las estrategias para aumentar las ganancias genéticas de manera eficiente. El objetivo del trabajo fue estimar la eficiencia de selección temprana en familias de medios hermanos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden seleccionadas antes del año 5 en base al diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (HT) y volumen cilíndrico (VOL) dentro de un programa de mejoramiento genético para madera sólida. Los ensayos de progenie, agrupados en dos poblaciones según la fuente de semilla (Población 1 y Población 2), fueron plantados en el año 2009 en los departamentos de Tacuarembó y Cerro Largo, con diseño de bloques completos al azar (BCA) y parcela individual (STP). Se identificó interacción genotipo por ambiente en la Población 2 para DAP y VOL. Las heredabilidades medias fueron crecientes al acercarse al año 5, DAP 0,21 a 0,36, HT 0,42 a 0,54 y VOL 0,20 a 0,36. Las correlaciones genéticas edad-edad fueron altas ($> 0,70$) a partir del año 3. El DAP fue la variable que presentó mejor correlación genética con el VOL ($> 0,60$) a partir del año 3. La eficiencia de selección (E) fue mayor en los años 3 y 4. El diferencial de selección por la selección de VOL en base a sus componentes fue menor al 10% a partir del año 3. Los parámetros genéticos, los porcentajes de G/año y la E para DAP,

HT y VOL presentaron comportamientos similares dentro de cada ensayo y diferencias entre ensayos, las cuales indican el potencial de la selección temprana previa al año 5 en poblaciones de *E. grandis*, y la posibilidad de acortar fase de evaluación del material a fin de reducir el ciclo de mejora.

Palabras claves: parámetros genéticos, polinización abierta, correlación edad-edad, intensidad de selección.

Early Selection Efficiency for Growth in two Half-sib Population of *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden

2.2 SUMMARY

Reducing the time in each cycle on breeding programs is one strategy to increase genetic gains. The objective of the study was to estimate the efficiency of early selection in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden half-sib families selected prior to year 5 based on diameter at breast height (DBH), total height (HT) and cylindrical volume (VOL) in a solid wood genetic improvement program. Progeny trials, grouped in two populations according to the seed source (Population 1 and Population 2), were planted in 2009 in the departments of Tacuarembó and Cerro Largo, Uruguay, with randomized complete block design (BCA) and single tree plot (STP). Genotype by environment interaction was identified in Population 2 for DAP and VOL. Mean heritability increased as they approached year 5, DAP 0.21 to 0.36, HT 0.42 to 0.54 and VOL 0.20 to 0.36. Age-age genetic correlations were high (> 0.70) from year 3. DAP was the variable that presented the highest genetic correlation with VOL (> 0.60) from year 3. The selection efficiency (E) was higher in years 3 and 4. The selection differential for the selection of VOL based on its components was less than 10% from year 3. The genetic parameters, the percentages of G/year and the E for DAP, HT and VOL showed similar behaviors within each trial and variations between trials which indicate the potential for early selection prior to year 5 in populations of *E. grandis* and shorten the time of the material evaluation phase to reduce the cycle of improvement.

Key words: genetic parameters, open pollination, age-age correlation, selection intensity.

2.3 INTRODUCCIÓN

El ciclo de mejora se compone de una fase de prueba, donde el material es evaluado y una fase de cría, en la cual el material es multiplicado (Borralho, Cotterill y Kanowski, 1992). La duración de la fase de evaluación de un material de *E. grandis* requiere varios años dependiendo del objetivo de mejora y del material que se produzca. La reducción en la duración de esta fase se logra mediante la selección temprana de los árboles (Moraes et al., 2014; Wu, 1998; Borralho, Cotterill y Kanowski, 1992). Esta reducción de tiempo maximiza las ganancias genéticas por unidad de tiempo, y permite justificar los gastos asociados con el mejoramiento de árboles (White, Adams y Neale, 2007).

Una de las formas de cuantificar la eficiencia de selección temprana es por medio del estudio de la correlación genética edad-edad, es decir, entre edades tempranas y posteriores en el mismo árbol, que se cuantifica en términos de ganancias genéticas. Por lo que la presencia de una alta correlación juvenil-adulta es uno de los factores más importantes para lograr una eficiente selección temprana (Wu, 1998; Borralho, Cotterill y Kanowski, 1992).

La necesidad de adelantar la formación de la población de propagación y mejora en el primer ciclo genera el dilema de cuanta ganancia genética se puede sacrificar para acortar la fase de evaluación del material. Las selecciones realizadas dentro del primer ciclo de mejora impactan el avance hacia la siguiente generación (White, Adams y Neale, 2007), es por eso que para la selección temprana se debe determinar la eficiencia de seleccionar por la variable de interés en los primeros años.

La hipótesis central de este trabajo fue que existe una dependencia interanual del crecimiento (VOL) y sus componentes (DAP y HT) en el intervalo de dos a cinco

años que permite realizar una selección temprana en poblaciones de medios hermanos de *E. grandis* previa a los cinco años. El objetivo fue estimar la eficiencia de selección temprana previa al quinto año, por crecimiento y sus componentes en dos poblaciones de medios hermanos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en los Departamentos de Tacuarembó y Cerro Largo, Uruguay.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Material evaluado

En la primavera de 2009 se instalaron cinco pruebas de progenies de medios hermanos, conformando dos poblaciones de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, en los departamentos de Tacuarembó (TB) y Cerro Largo (CL), pertenecientes a la empresa Weyerhaeuser Productos S.A./Lumin®. En ambos departamentos la temperatura media anual es de 18 °C, las temperaturas máximas medias son 23 – 24 °C y las mínimas medias 12 – 13 °C, las precipitaciones anuales están entre 1400 – 1500 mm, y el promedio anual de heladas agro-meteorológicas (mayo a octubre) es de 35 días (Castaño et al., 2011). Los suelos en las pruebas instaladas en Tacuarembó (establecimiento Sauce Solo 5, 31°45'13.68" S – 55°51'55.40" W) corresponden a suelos moderadamente profundos, de textura franco-arenosa, fertilidad muy baja y bien drenados (Grupo Coneat 7.2); mientras que los suelos de las pruebas instaladas en Cerro largo (establecimiento Milagros, 32°49'34.69" S – 54°59'29.41" W) corresponden a suelos franco arenosos a gravillosos, a veces pedregosos, superficiales a moderadamente profundos y ácidos (Grupo Coneat 2.11a) (DGRN, 2017). La preparación del suelo en todas las pruebas (forestación) consistió en doble pasada con rastra.

La Población 1 estuvo compuesta por 137 familias procedentes de un huerto semillero de la Universidad de Florida – EUA y la Población 2 estuvo formada por 69 familias procedentes de un ensayo de progenie/procedencia de la empresa Pomera Maderas – AR/PY.

Los ensayos tuvieron un diseño de bloques completos al azar (BCA), con parcela individual (single tree plot - STP) y 25 repeticiones, con un espaciamiento de 4 x 2 m y una poda a 3 m de altura. Las variables evaluadas fueron diámetro a la altura del pecho a 1,30 m (DAP en cm) y altura total del árbol (HT en m), en las edades de 2, 3, 4 y 5 años. La HT en el año 2 se midió con una regla de fibra de vidrio (Pértiga), mientras que, para la medición en los años 3, 4 y 5 se utilizó el Vertex® (Vertex IV, Suecia); para la medición del DAP se utilizó una cinta diamétrica. Posteriormente se calculó el volumen cilíndrico individual con corteza (VOL en m³) para las edades 2 a 5 años.

2.4.2 Análisis de datos

Para el análisis de los datos se mantuvieron por ensayo aquellas familias que presentaron una sobrevivencia igual o mayor al 60% al año 5, quedando de esta forma 45 y 49 familias para los ensayos de la Población 1; y 60, 63 y 66 familias para los ensayos de la Población 2.

Los BLUPs (Mejores predictores lineales insecados) y los componentes de varianza por ensayo y por edad para DAP (cm), HT (m) y VOL (m³) fueron estimados con un modelo lineal mixto, en el procedimiento MIXED de SAS® (SAS, 9.3, 2011, Carolina del Norte, EUA), por el método REML (Máxima verosimilitud restringida). El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + B_j + P(F)_{ik} + \xi_{ijk}$$

Donde, Y_{ijk} son las variables DAP, HT y VOL, F_i efecto aleatorio de la i -ésima familia; B_j efecto fijo del bloque; $P(F)_{ik}$ efecto aleatorio de planta dentro de familia y ξ_{ijk} error experimental (residual, interacción repetición por familia).

Posteriormente los BLUP familiares por ensayo y por edad para DAP, HT y VOL se sumaron al estimador de la media general de cada ensayo en cada edad para obtener el valor BLUPm comparable en la escala de cada variable analizada.

Así mismo, se estimaron las correlaciones fenotípicas y genéticas (Pearson) (Holland, 2006) por ensayo y población para las variables DAP, HT y VOL entre los valores de cada año y el año 5; y las correlaciones fenotípicas y genéticas entre variables por población y ensayo comparando cada año con el año 5. En estos análisis, para mantener el balance entre familias y bloques (réplicas) por ensayo, se utilizaron aquellas familias con al menos tres mediciones (edades), así como aquellos bloques que tuvieran más del 80% de las familias.

Para estimar los efectos de interacción genotipo por ambiente (IGA) de las dos poblaciones en las dos localidades evaluadas se realizó la prueba de razón de verosimilitud ($LRT = -2(\log Mr - \log Mc)$), en la cual se compararon dos modelos de análisis conjunto de los experimentos correspondientes a cada población: el primero incluyendo el término de interacción familia por localidad (modelo completo, Mc) y el segundo sin incluir el término de interacción (modelo reducido, Mr); el estadístico LRT sigue una distribución de CHI-cuadrado con grados de libertad iguales a la diferencia de GL residuales de los dos modelos (Mora, Pupim-Junior, Scapim, 2007; Yang, 2002).

Se estimaron las heredabilidades individuales (h^2) en sentido estricto para cada variable por edad y ensayo, para esto se utilizó el procedimiento VARCOMP de SAS®, determinándose la varianza genética aditiva (σ_A^2), varianza de las familias (σ_F^2) y varianza residual (σ_E^2). Se asumió que la varianza de familias fue 1/3 de la varianza genética aditiva, debido a que corresponden a familias de medios hermanos de especies forestales (Farfán et al., 2002; Hernández et al., 2016). La ecuación utilizada para estimar h^2 fue:

$$h^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_P^2} = \frac{3\sigma_F^2}{(\sigma_F^2 + \sigma_E^2)}$$

Para determinar la respuesta a la selección para cada año sobre cada variable en cada ensayo se utilizó la fórmula propuesta por Zobel y Talbert (1988), la cual indica que tanto la intensidad de selección (i), la heredabilidad (h^2) y la variación fenotípica (σ_p) afectan las ganancias (G) que puedan lograrse. Se definió como base de selección una proporción del 20% de la población, obteniendo así una intensidad de selección (i) de 1,40. La ecuación utilizada para G fue:

$$G = i \cdot h^2 \cdot \sigma_p$$

En base a la G se determinaron los porcentajes de ganancia (% G) y porcentaje de ganancia por año (% G /año), el primero corresponde al porcentaje de ganancia que se obtiene sobre la media, y el segundo es el porcentaje dividido el número de años para en que esa G pueda multiplicarse, es decir el número de años de selección más dos años.

Para la eficiencia de selección temprana (E) se utilizó la fórmula propuesta por Lambeth (1980), la cual estima ganancias por año de trabajo en comparación con la ganancia de la selección en la madurez, utilizando los valores de heredabilidades y correlaciones genéticas. Para este estudio se tomó como edad de madurez el año 5, ya que es la línea base contra la cual se busca estimar la eficiencia de selección, y como edades juveniles 2, 3 y 4 años respectivamente; tanto para edad madura como juvenil se sumaron 2 años, que es el tiempo estimado para que los árboles seleccionados puedan multiplicarse, ya sea por injertos o como clones.

$$E = \frac{h_x r_{A(XZ)} T_Z}{h_Z T_x}$$

Donde, h_x raíz cuadrada de la heredabilidad del rasgo juvenil, $r_{A(xz)}$ correlación genética del rasgo juvenil (x) y rasgo maduro (z), T_z número de años para poder iniciar el siguiente paso de mejora en base al año 5 ($T_z = 5 + 2$), h_z raíz cuadrada de la heredabilidad del rasgo maduro y T_x número de años para poder iniciar el siguiente paso de mejora en edades juveniles (2, 3 y 4 años, donde $T_x = t + 2$) y.

Para complementar los valores de E, se calcularon la ganancia correlacionada (GC) y la ganancia por unidad de tiempo (GT) lograda en cada año, para cada ensayo y variable según Zobel y Talbert (1988), las ecuaciones utilizadas para GC y GT fueron:

$$GC = ih_j h_m r_G \sigma_{pm}$$

Donde, GC es ganancia correlacionada, i intensidad de selección, h_j raíz cuadrada de la heredabilidad de la característica juvenil, h_m raíz cuadrada de la heredabilidad de la característica madura, r_G correlación genética entre las características juvenil y madura y σ_{pm} desviación estándar fenotípica de la característica madura.

$$G_T = \frac{GC}{T}$$

Donde, G_T ganancia correlacionada por unidad de tiempo, GC ganancia correlacionada y T intervalo de generación.

Se realizó un ranking familiar en base al BLUP para las variables DAP, HT y VOL por año y ensayo. Posteriormente, definiendo el VOL 5 años como el objetivo de selección, se analizó el efecto en la media del volumen objetivo al seleccionar por VOL y sus componentes (DAP, HT) a los 2, 3, 4 y 5 años. A efectos de este estudio

se realizó una selección familiar por ensayo y la aplicación de dos criterios de selección:

Criterio 1: Selección en cada año (2, 3, 4 y 5) del 20% de las mejores familias según sus valores BLUPm en escala real por variable (DAP, HT y VOL) y por ensayo. Determinación del diferencial de selección ($S = \mu_5 - \mu_{2,3,4}$ donde, μ_5 es la media del 20% de las mejores familias en el año objetivo y $\mu_{2,3,4}$ es la media de las familias al año 5 que fueron seleccionadas al año 2, 3 o 4). Esta determinación fue hecha para las tres variables por separado y del VOL en función de la selección realizada por DAP y HT.

Criterio 2: Eliminación del 50% de familias al año 2, 3 y 4, es decir que a efectos del análisis no fueron tomadas en cuenta. Determinación del diferencial de selección ($S = \mu_5 - \mu_{2,3,4}$ donde, μ_5 es la media del 50% de las familias en el año objetivo y $\mu_{2,3,4}$ es la media del 50% las familias al año 5 que fueron seleccionadas al año 2, 3 o 4). Esta determinación fue hecha para las tres variables por separado y del VOL en función de la selección realizada por DAP y HT. Luego se cuantificó el número de familias pérdidas dentro del 20% de las familias en el año 5 al aplicar este criterio en los diferentes años.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Descripción general de los ensayos

Las mediciones de las variables DAP (diámetro a la altura del pecho), HT (altura total) y VOL (volumen) en dos poblaciones de medios hermanos de *E. grandis* abarcaron cuatro años de estudios (año 2 al año 5) en los cuales las variables presentaron variaciones en los diferentes momentos de medición. La distribución del DAP, HT y VOL muestra que independientemente a la edad de la plantación es posible encontrar variaciones que permitirían realizar selecciones de material superior (Figura 1).

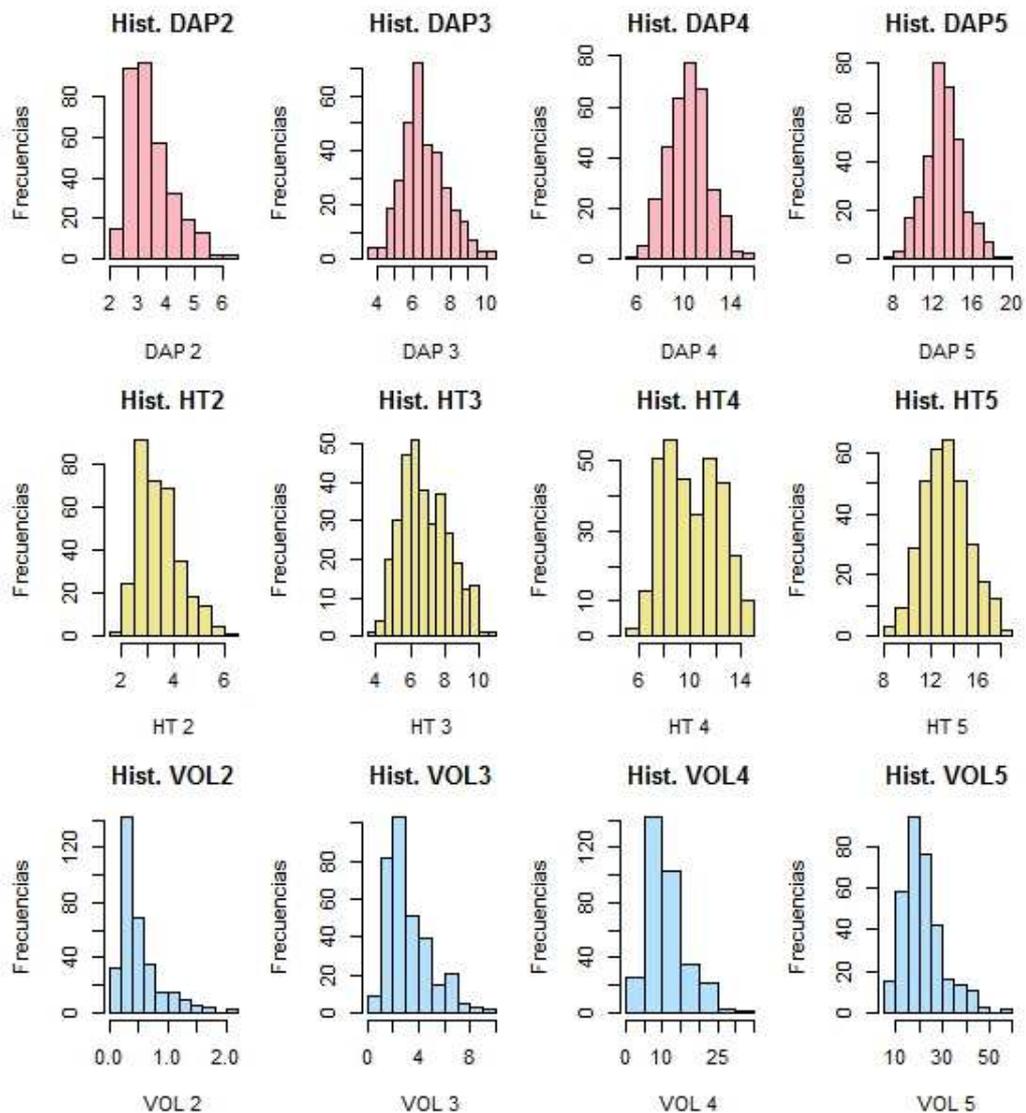


Figura 1. Cambios globales en la distribución de las frecuencias de las medias de las familias evaluadas para las tres variables, en dos localidades y a través de los años.

Como marco de referencia del crecimiento del *E. grandis* en las localidades evaluadas se obtuvieron promedios al año 5 de las diferentes variables, la Población 1 (Universidad de Florida) presentó 12,60 ($\pm 3,6$) cm de DAP, 12,06 ($\pm 2,5$) m de HT y 0,178 ($\pm 0,11$) m³ de VOL, mientras que la Población 2 tuvo 13,32 ($\pm 4,1$) cm de DAP, 14,00 ($\pm 3,2$) m de HT y 0,236 ($\pm 0,17$) m³ de VOL. El VOL promedio en el Departamento de Cerro Largo fue de 0,174 ($\pm 0,11$) m³, mientras que en Tacuarembó fue de 0,251 ($\pm 0,18$) m³.

2.5.2 Interacción genotipo por ambiente

Se detectó interacción genotipo por ambiente (IGA) para las variables DAP y VOL en las familias de la población 2 entre los departamentos de Cerro Largo y Tacuarembó. Por otro lado, no se presentaron interacciones para DAP, HT y VOL en la población 1, ver Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de la razón de verosimilitud para determinar presencia de interacción genotipo por ambiente (IGA) en las tres variables y dos poblaciones.

Variable	Población	.-2 Log Modelo reducido	.-2 Log Modelo completo	Razón de verosimilitud	χ^2 (0.05)	IGA
DAP	1	42132,1	42132,1	0	3,84	No
	2	99602,3	99571,9	30,4	3,84	Si
HT	1	60807,6	60807,6	0	3,84	No
	2	129270,9	129270,9	0	3,84	No
VOL	1	(-13761,7)	(-13761,7)	0	3,84	No
	2	(-20895,3)	(-20936,6)	41,3	3,84	Si

LR: modelo reducido, LC: modelo completo, RV: razón de verosimilitud, IGA: interacción genotipo por ambiente.

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

2.5.3 Parámetros genéticos

Las heredabilidades individuales (h^2) para DAP, HT y VOL presentaron variaciones que fueron de 0,11 a 0,84 para DAP; 0,14 a 0,90 para HT; y 0,09 a 0,81 para VOL (Cuadro 2). Las medias de h^2 presentaron un aumento gradual en cada variable de acuerdo con la edad, la HT presentó el mayor valor. Sin embargo, no se observó un patrón de aumento de la h^2 a través de los años en los diferentes ensayos, no siempre la mayor edad representó el mayor valor de heredabilidad. El ensayo CL113 presentó valores altos de h^2 para las tres variables.

Cuadro 2. Valores de heredabilidad individual (h^2) por edad (año), ensayos y variables (DAP, HT, VOL) para las dos poblaciones analizadas.

Ensayo	Población	Variable	Heredabilidad (h^2)			
			Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
CL104	2	DAP	0,15	0,27	0,36	0,35
		HT	0,34	0,37	0,47	0,34
		VOL	0,09	0,23	0,29	0,34
CL113	1	DAP	0,36	0,66	0,81	0,84
		HT	0,66	0,72	0,88	0,90
		VOL	0,39	0,59	0,75	0,81
TB102	2	DAP	0,43	0,38	0,37	0,39
		HT	0,45	0,31	0,30	0,38
		VOL	0,41	0,35	0,36	0,42
TB103	2	DAP	0,14	0,12	0,11	0,15
		HT	0,14	0,22	0,17	0,17
		VOL	0,10	0,10	0,13	0,18
TB112	1	DAP	0,11	0,28	0,19	0,30
		HT	0,29	0,41	0,21	0,26
		VOL	0,12	0,22	0,17	0,27
Medias		DAP	0,21	0,31	0,30	0,36
		HT	0,42	0,45	0,51	0,54
		VOL	0,20	0,28	0,31	0,36

CL104, CL113: ensayos Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: ensayos Tacuarembó

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

DAP (Diámetro a la altura del pecho), HT (altura total), VOL (Volumen)

2.5.4 Correlaciones edad-edad y variable-variable

Las correlaciones fenotípicas y genéticas entre el año 5 y los demás años de estudio para todas las variables y localidades, fueron mayores a medida que la distancia en el tiempo disminuyó. Estas correlaciones edad-edad fueron altas y positivas a partir del año 3, con valores superiores a 0,70 para las tres variables estudiadas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlaciones fenotípicas y genéticas dentro de las variables DAP, HT y VOL, por ensayo en cada año con respecto al año objetivo (año 5) para las dos poblaciones.

Ensayos	Población	Edad	Correlaciones Fenotípicas			Correlaciones Genéticas		
			DAP	HT	VOL	DAP	HT	VOL
CL104	2	A2 - A5	0,602	0,605	0,535	0,536	0,593	0,449
		A3 - A5	0,814	0,772	0,795	0,794	0,839	0,773
		A4 - A5	0,955	0,914	0,943	0,977	0,974	0,981
CL113	1	A2 - A5	0,639	0,678	0,581	0,675	0,805	0,560
		A3 - A5	0,831	0,830	0,796	0,885	0,920	0,835
		A4 - A5	0,966	0,944	0,958	0,986	0,993	0,988
TB102	2	A2 - A5	0,718	0,642	0,708	0,785	0,733	0,729
		A3 - A5	0,878	0,793	0,869	0,913	0,943	0,918
		A4 - A5	0,976	0,928	0,968	0,987	1,000	0,990
TB103	2	A2 - A5	0,721	0,652	0,652	0,221	0,412	0,771
		A3 - A5	0,853	0,787	0,843	0,668	0,860	1,040
		A4 - A5	0,958	0,876	0,959	0,972	0,981	1,013
TB112	1	A2 - A5	0,597	0,591	0,534	0,510	0,562	0,388
		A3 - A5	0,804	0,751	0,790	0,765	0,823	0,760
		A4 - A5	0,956	0,912	0,943	0,976	0,974	0,982

CL104, CL113: ensayos Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: ensayos Tacuarembó

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

A2= año 2, A3= año 3, A4= año 4, A5= año 5.

DAP (diámetro a la altura del pecho), HT (altura total), VOL (volumen)

Las correlaciones genéticas entre las variables de crecimiento fueron altas y positivas a partir del año 3. La correlación entre DAP y VOL fue más alta que la correlación de la HT con el VOL, los valores fueron aumentando a medida que se acercan al año objetivo, a partir del tercer año las correlaciones fenotípicas fueron mayores a 0,70 y las correlaciones genéticas mayores a 0,60 (Cuadro 4). El ensayo CL113 presentó los valores más altos en las correlaciones de variable-variable.

Cuadro 4. Correlaciones genéticas entre las variables DAP x HT, DAP x VOL y HT x VOL por edad con respecto al año objetivo (año 5) para todos los ensayos y las dos poblaciones analizadas.

Ensayo	Población	Año	Correlaciones Fenotípicas			Correlaciones Genéticas		
			DAPxHT	DAPxVOL	HTxVOL	DAPxHT	DAPxVOL	HTxVOL
CL104	2	A2 - A5	0,526	0,558	0,611	0,420	0,327	0,440
		A3 - A5	0,707	0,781	0,745	0,730	0,736	0,737
		A4 - A5	0,822	0,894	0,851	0,906	0,936	0,884
		A5 - A5	0,868	0,946	0,853	0,928	0,984	0,930
CL113	1	A2 - A5	0,563	0,594	0,697	0,690	0,568	0,746
		A3 - A5	0,727	0,791	0,806	0,848	0,836	0,863
		A4 - A5	0,860	0,906	0,896	0,949	0,950	0,956
		A5 - A5	0,885	0,952	0,875	0,967	0,981	0,960
TB102	2	A2 - A5	0,580	0,709	0,712	0,607	0,672	0,698
		A3 - A5	0,736	0,849	0,776	0,745	0,837	0,863
		A4 - A5	0,824	0,942	0,811	0,847	0,947	0,864
		A5 - A5	0,851	0,960	0,826	0,898	0,988	0,880
TB103	2	A2 - A5	0,601	0,703	0,717	0,559	0,181	0,283
		A3 - A5	0,720	0,830	0,800	0,630	0,520	0,763
		A4 - A5	0,793	0,924	0,863	0,831	0,916	0,893
		A5 - A5	0,828	0,953	0,849	0,769	0,973	0,736
TB112	1	A2 - A5						
		A3 - A5						
		A4 - A5	0,749	0,862	0,821	0,677	0,847	0,848
		A5 - A5	0,836	0,936	0,844	0,849	0,962	0,903

CL104, CL113: ensayos Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: ensayos Tacuarembó

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

A2: año 2, A3: año 3, A4: año 4, A5: año 5.

DAP (diámetro a la altura del pecho), HT (altura total), VOL (volumen)

2.5.5 Ganancias genéticas y eficiencia de selección

La respuesta a la selección por edad y ensayo para cada variable, con una intensidad de selección del 20%, fue mayor a medida que aumentó la edad de los árboles. Sin embargo, los porcentajes de ganancia (%G) más altos son variables según el año y el ensayo. Por otro lado, al observar el porcentaje de ganancia por unidad de tiempo (% G/año) se obtienen ganancias superiores en años previos al año 5 en los diferentes ensayos y edades, teniendo los valores más altos en el año 2 la variable HT, en los años 2 y 3 el VOL y el DAP dependiendo del ensayo las ganancias altas están entre el año 2 y 4. El VOL presentó los mayores valores de %G y %G/año, seguido de la HT y el DAP (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ganancias genéticas (G) estimadas para la selección de familias, porcentaje de ganancia (%G) y porcentaje de Ganancia por año (% G/año) para las variables DAP, HT y VOL por ensayo y edad, para las dos poblaciones analizadas.

Ensayo	Población	Edad	DAP (cm)			HT (m)			VOL (m ³)		
			G	%G	% G/año	G	%G	% G/año	G	%G	% G/año
CL104	2	2	0,18	5,6	1,4	0,39	12,8	3,2	0,0003	9,4	2,3
		3	0,59	10,3	2,0	0,69	12,2	2,4	0,0038	20,4	4,1
		4	1,34	14,2	2,4	1,25	14,8	2,5	0,0174	23,7	4,0
		5	1,63	13,5	1,9	1,07	8,7	1,2	0,0446	27,2	3,9
CL113	1	2	0,49	14,8	3,7	0,88	28,4	7,1	0,0016	40,8	10,2
		3	1,54	25,3	5,1	1,60	26,5	5,3	0,0113	52,2	10,4
		4	3,18	30,3	5,0	2,66	28,2	4,7	0,0580	60,6	10,1
		5	4,20	33,0	4,7	3,24	25,8	3,7	0,1261	67,1	9,6
TB102	2	2	0,94	20,1	5,0	0,90	19,6	4,9	0,0051	45,7	11,4
		3	1,30	15,8	3,1	0,87	9,9	1,9	0,0182	31,4	6,3
		4	1,89	15,4	2,6	1,08	8,3	1,4	0,0577	31,6	5,3
		5	2,46	16,4	2,3	1,70	10,6	1,5	0,1221	36,4	5,2
TB103	2	2	0,23	6,4	1,6	0,20	5,5	1,4	0,0007	12,2	3,1
		3	0,35	4,9	0,9	0,52	6,9	1,4	0,0036	9,7	1,9
		4	0,48	4,4	0,7	0,52	4,5	0,7	0,0151	11,8	2,0
		5	0,79	5,9	0,8	0,60	4,2	0,6	0,0355	15,5	2,2
TB112	1	2	0,12	4,1	1,0	0,37	13,9	3,5	0,0004	13,4	3,4
		3	0,75	12,7	2,5	1,02	17,0	3,4	0,0055	23,8	4,8
		4	0,76	8,6	1,4	0,64	8,1	1,3	0,0115	17,7	2,9
		5	1,45	11,7	1,7	0,86	7,6	1,1	0,0398	24,3	3,5

CL104, CL113: ensayos Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: ensayos Tacuarembó

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

DAP, diámetro altura del pecho; HT, altura total; VOL, volumen

La ganancia correlacionada (GC) entre una edad determinada y el año 5, aumentó a medida que se acercaba a la edad objetivo. Mientras que la ganancia por unidad de tiempo (GT) no presentó un patrón definido por variable y ensayo. Se observó una GT mayor en años previos al año 5 en la variable HT, si bien las otras dos variables presentan GT altos en algunos casos previos al año 5 estos varían por ensayo. La eficiencia de selección temprana (E) fue superior a 1 en tres ensayos (CL104, CL113, TB102) para las tres variables (DAP, HT y VOL) indicando la eficiencia de seleccionar en edades previas al año 5. Por otro lado, dos ensayos (TB103 y TB112) presentaron una E superior a 1 previa al año 5 solo en la variable HT (Cuadro 6). Los valores más altos de eficiencia de selección ($E > 1$) entre las edades de 2 y 4 años fueron variables según el ensayo evaluado.

Cuadro 6. Ganancia correlacionada (GC), ganancia correlacionada por unidad de tiempo (GT) y eficiencia de selección (E) para las variables DAP, HT y VOL por ensayo y edad. El año 5 es la línea base de comparación, para las dos poblaciones analizadas.

Ensayo	Población	Edad	DAP (cm)			HT (m)			VOL (m ³)		
			G _C	G _T	E	G _C	G _T	E	G _C	G _T	E
CL104	2	2	0,63	0,16	0,44	0,63	0,16	0,98	0,0102	0,0026	0,36
		3	1,20	0,24	0,92	1,47	0,29	1,62	0,0284	0,0057	0,87
		4	1,62	0,27	1,14	1,22	0,20	1,28	0,0404	0,0067	1,04
		5	1,63	0,23	1,00	1,07	0,15	1,00	0,0446	0,0064	1,00
CL113	1	2	1,85	0,46	0,65	2,18	0,54	1,19	0,0487	0,0122	0,66
		3	3,31	0,66	1,08	2,60	0,52	1,14	0,0901	0,0188	0,99
		4	4,08	0,68	1,12	3,10	0,52	1,16	0,1206	0,0201	1,11
		5	4,20	0,60	1,00	3,06	0,44	1,00	0,1261	0,0180	1,00
TB102	2	2	2,03	0,51	1,31	1,36	0,34	1,28	0,0883	0,0221	1,23
		3	2,22	0,44	1,18	1,45	0,29	1,03	0,1024	0,0205	1,12
		4	2,37	0,40	1,09	1,51	0,25	0,99	0,1120	0,0187	1,05
		5	2,46	0,35	1,00	1,70	0,24	1,00	0,1220	0,0174	1,00
TB103	2	2	0,17	0,04	0,84	0,22	0,06	0,79	0,0206	0,0052	0,69
		3	0,48	0,10	0,93	0,59	0,12	1,19	0,0299	0,0056	0,83
		4	0,67	0,11	0,94	0,59	0,10	1,02	0,0310	0,0052	0,94
		5	0,79	0,11	1,00	0,60	0,09	1,00	0,0354	0,0051	1,00
TB112	1	2	0,44	0,11	0,35	0,52	0,13	1,12	0,0102	0,0026	0,36
		3	1,07	0,21	0,94	0,89	0,18	1,33	0,0273	0,0055	0,90
		4	1,12	0,19	0,82	0,76	0,13	0,90	0,0312	0,0052	0,84
		5	1,45	0,21	1,00	0,86	0,12	1,00	0,0398	0,0057	1,00

El año 5 corresponde al año base de comparación, el valor expresado en GC, corresponde a la G de ese año.

CL104, CL113: ensayos Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: ensayos Tacuarembó

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

DAP, diámetro altura del pecho, HT, altura total, VOL, volumen

2.5.6 Simulación de selección

La selección temprana por variable individual para DAP, HT y VOL aplicando el criterio de selección del 20% de las familias por ensayo para las edades de 2, 3 y 4 años generó un diferencial de selección (S_{5x}) que aumenta a medida que se acerca al año 5. Las pérdidas en el diferencial de selección por seleccionar en años previos al año 5 fue bajo a partir del año 3, siendo menor al 3,1% para DAP, 1,6% para HT y 6,0% para VOL, estos valores presentaron variaciones entre ensayos (Cuadro 7, 8 y 9).

Cuadro 7. Comportamiento del DAP según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 1 (selección del 20% de familias superiores). Siendo DAP_{520%}, la media del 20% de las mejores familias al año 5; DAP_{5x20%}, media al año 5 del 20% de las familias seleccionadas en el año x (2, 3 y 4); DAP₅, media del ensayo; S₅, diferencial de selección en el año 5; S_{5x}, diferencial de selección en el año 5 en base al año x; Pérdida de S, diferencia entre S₅ y S_{5x} y el % porcentaje correspondiente.

Ensayo	Población	Edad (x)	DAP _{520%} (cm)	DAP _{5x20%} (cm)	DAP ₅ (cm)	S ₅ (cm)	S _{5x} (cm)	Pérdida de S (cm)	Pérdida de S (%)
CL104	2	2		12,74			0,77	0,43	3,3
		3	13,17	13,07	11,97	1,20	1,10	0,10	0,8
		4		13,11			1,14	0,06	0,5
CL113	1	2		13,60			1,04	0,98	6,7
		3	14,58	14,44	12,56	2,02	1,88	0,14	1,0
		4		14,46			1,90	0,12	0,8
TB102	2	2		16,28			1,44	0,44	2,6
		3	16,72	16,69	14,84	1,88	1,85	0,03	0,2
		4		16,65			1,81	0,07	0,4
TB103	2	2		13,79			0,55	0,31	2,2
		3	14,10	13,96	13,24	0,86	0,72	0,14	1,0
		4		14,03			0,79	0,07	0,5
TB112	1	2		12,57			0,28	0,79	5,9
		3	13,36	12,95	12,29	1,07	0,66	0,41	3,1
		4		13,22			0,93	0,14	1,0

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

Cuadro 8. Comportamiento del HT según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 1 (selección del 20% de familias superiores). Siendo HT₅_{20%}, la media del 20% de las mejores familias al año 5; HT_{5x}_{20%}, media al año 5 del 20% de las familias seleccionadas en el año x (2, 3 y 4); HT₅, media del ensayo; S₅, diferencial de selección en el año 5; S_{5x}, diferencial de selección en el año 5 en base al año x; Pérdida de S, diferencia entre S₅ y S_{5x} y el % porcentaje correspondiente.

Ensayo	Población	Edad (x)	HT ₅ _{20%} (m)	HT _{5x} _{20%} (m)	HT ₅ (m)	S ₅ (m)	S _{5x} (m)	Pérdida de S (m)	Pérdida de S (%)
CL104	2	2		12,79			0,55	0,19	1,5
		3	12,98	12,87	12,24	0,74	0,63	0,11	0,8
		4		12,92			0,68	0,06	0,5
CL113	1	2		13,38			0,93	0,40	2,9
		3	13,78	13,56	12,45	1,33	1,11	0,22	1,6
		4		13,73			1,28	0,05	0,4
TB102	2	2		16,70			0,83	0,35	2,1
		3	17,05	16,86	15,87	1,18	0,99	0,19	1,1
		4		17,04			1,17	0,01	0,1
TB103	2	2		14,54			0,42	0,17	1,2
		3	14,71	14,65	14,12	0,59	0,53	0,06	0,4
		4		14,68			0,56	0,03	0,3
TB112	1	2		11,23			0,06	0,57	4,8
		3	11,80	11,69	11,17	0,63	0,52	0,11	0,9
		4		11,70			0,53	0,10	0,8

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

Cuadro 9. Comportamiento del VOL según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 1 (selección del 20% de familias superiores). Siendo VOL₅_{20%}, la media del 20% de las mejores familias al año 5; VOL_{5x}_{20%}, media al año 5 del 20% de las familias seleccionadas en el año x (2, 3 y 4); VOL₅, media del ensayo; S₅, diferencial de selección en el año 5; S_{5x}, diferencial de selección en el año 5 en base al año x; Pérdida de S, diferencia entre S₅ y S_{5x} y el % porcentaje correspondiente.

Ensayo	Población	Edad (x)	VOL ₅ _{20%} (m ³)	VOL _{5x} _{20%} (m ³)	VOL ₅ (m ³)	S ₅ (m ³)	S _{5x} (m ³)	Pérdida de S (m ³)	Pérdida de S (%)
CL104	2	2		0,1778			0,0160	0,0198	10,0
		3	0,1976	0,1954	0,1618	0,0358	0,0336	0,0022	1,1
		4		0,1947			0,0329	0,0029	1,5
CL113	1	2		0,2140			0,0309	0,0374	14,9
		3	0,2514	0,2450	0,1831	0,0683	0,0619	0,0064	2,5
		4		0,2472			0,0641	0,0042	1,7
TB102	2	2		0,4046			0,0753	0,0220	5,2
		3	0,4266	0,4200	0,3293	0,0973	0,0907	0,0066	1,5
		4		0,4232			0,0939	0,0034	0,8
TB103	2	2		0,2534			0,0243	0,0155	5,8
		3	0,2689	0,2655	0,2291	0,0398	0,0364	0,0034	1,3
		4		0,2673			0,0382	0,0016	0,6
TB112	1	2		0,1714			0,0109	0,0231	11,9
		3	0,1945	0,1828	0,1605	0,0340	0,0223	0,0117	6,0
		4		0,1934			0,0329	0,0011	0,6

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.

Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

El comportamiento del VOL al año 5 al seleccionar indirectamente por DAP o HT fue similar a lo ya mencionado anteriormente, donde los valores de S_{5X} aumentan con la edad. A partir del año 3 la pérdida en el S fue 6,8% para DAP/VOL y 7,4% para HT/VOL (Cuadro 10).

Cuadro 10. Comportamiento del VOL seleccionando el 20% de las mejores familias en función al DAP y HT según el año (Edad x), ensayo y población. Siendo VOL5, media de VOL al año 5 por ensayo; VOL5x20%, media de volumen al año 5 del 20% de las familias seleccionadas en el año x en base al DAP y HT; S_{5xDAP, HT}, diferencial de selección en el año 5 en base al año x para DAP y HT; Pérdida de S, diferencia entre S₅ de VOL y S_{5xDAP, HT} y el % porcentaje correspondiente.

Ensayo	Población	Edad (x)	VOL5 (m ³)	VOL5x20% (m ³) en DAP	S _{5xDAP} (m ³)	Pérdida de S (m ³)	Pérdida de S (%)	VOL5x20% (m ³) en HT	S _{5xHT} (m ³)	Pérdida de S (m ³)	Pérdida de S (%)
CL104	2	2		0,1847	0,0229	0,0129	6,5	0,1900	0,0282	0,0076	3,8
		3	0,1618	0,1941	0,0323	0,0035	1,8	0,1942	0,0324	0,0034	1,7
		4		0,1950	0,0332	0,0026	1,3	0,1919	0,0301	0,0057	2,9
CL113	1	2		0,2217	0,0386	0,0297	11,8	0,2280	0,0449	0,0234	9,3
		3	0,1831	0,2468	0,0637	0,0046	1,8	0,2327	0,0496	0,0187	7,4
		4		0,2448	0,0617	0,0066	2,6	0,2464	0,0633	0,0050	2,0
TB102	2	2		0,4083	0,0790	0,0183	4,3	0,4147	0,0854	0,0119	2,8
		3	0,3293	0,4218	0,0925	0,0048	1,1	0,4173	0,0880	0,0093	2,2
		4		0,4217	0,0924	0,0049	1,1	0,4147	0,0854	0,0119	2,8
TB103	2	2		0,2519	0,0228	0,0170	6,3	0,2508	0,0217	0,0181	6,7
		3	0,2291	0,2579	0,0288	0,0110	4,1	0,2553	0,0262	0,0136	5,1
		4		0,2630	0,0339	0,0059	2,2	0,2632	0,0341	0,0057	2,1
TB112	1	2		0,1742	0,0137	0,0203	10,4	0,1706	0,0101	0,0239	12,3
		3	0,1605	0,1813	0,0208	0,0132	6,8	0,1897	0,0292	0,0048	2,5
		4		0,1894	0,0289	0,0051	2,6	0,1869	0,0264	0,0076	3,9

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

El segundo criterio de selección fue la eliminación del 50% de las familias para DAP, HT y VOL, es decir un enfoque de selección negativa. Se observó que el S obtenido como consecuencia de la selección previa al año 5 para las variables individuales DAP, HT y VOL disminuyó a medida que la edad de selección se acercó al año objetivo. Los menores S se obtuvieron al seleccionar al año 3 y 4. La aplicación de este criterio para VOL en el año 3 y 4 no afectó al número de familias dentro del 20% superior al año 5, mientras que generó una reducción del 7,7% al 30% en el número de familias al seleccionar al año 2, ver Cuadros 11, 12 y 13.

Cuadro 11. Comportamiento del DAP según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 2 (eliminación del 50% de las familias). Siendo DAP_{50%} media del 50% de las familias al año 5; DAP_{5x50%} media al año 5 de las familias que no fueron afectadas por la eliminación en el año x; N° fp, número de familias perdidas en el 20% de las mejores familias en el año 5 con la eliminación en el año x.

Ensayo	Población	Edad (x)	DAP _{50%} (cm)	DAP _{5x50%} (cm)	Pérdida en DAP (cm)	Pérdida en DAP (%)	N° fp en 20% al año 5
CL104	2	2		12,18	0,46	3,6	2
		3	12,64	12,49	0,15	1,2	0
		4		12,63	0,01	0,1	0
TB102	1	2		15,58	0,34	2,1	1
		3	15,92	15,73	0,19	1,2	0
		4		15,87	0,05	0,3	0
TB103	2	2		13,53	0,22	1,6	3
		3	13,75	13,65	0,10	0,7	1
		4		13,72	0,03	0,2	0
CL113	2	2		13,21	0,72	5,2	3
		3	13,93	13,78	0,15	1,1	0
		4		13,93	0,00	0,0	0
TB112	1	2		12,44	0,42	3,3	2
		3	12,86	12,70	0,16	1,2	1
		4		12,80	0,06	0,5	0

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

Cuadro 12. Comportamiento del HT según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 2 (eliminación del 50% de las familias). Siendo HT_{50%} media del 50% de las familias al año 5; HT_{x50%} media al año 5 de las familias que no fueron afectadas por la eliminación en el año x; N° fp, número de familias perdidas en el 20% de las mejores familias en el año 5 con la eliminación en el año x.

Ensayo	Población	Edad (x)	HT _{50%} (m)	HT _{x50%} (m)	Pérdida en HT (m)	Pérdida en HT (%)	N° fp en 20% al año 5
CL104	2	2		12,46	0,23	1,8	2
		3	12,69	12,58	0,11	0,9	0
		4		12,67	0,02	0,2	0
TB102	1	2		16,25	0,29	1,8	1
		3	16,54	16,39	0,15	0,9	1
		4		16,52	0,02	0,1	0
TB103	2	2		14,28	0,21	1,4	1
		3	14,49	14,41	0,08	0,6	0
		4		14,46	0,03	0,2	0
CL113	2	2		13,17	0,14	1,1	0
		3	13,31	13,24	0,07	0,5	0
		4		13,24	0,07	0,5	0
TB112	1	2		11,38	0,16	1,4	1
		3	11,54	11,41	0,13	1,1	0
		4		11,47	0,07	0,6	0

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

Cuadro 13. Comportamiento del VOL según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 2 (eliminación del 50% de las familias). Siendo VOL_{50%} media del 50% de las familias al año 5; VOL_{5x50%} media al año 5 de las familias que no fueron afectadas por la eliminación en el año x; N° fp, número de familias perdidas en el 20% de las mejores familias en el año 5 con la eliminación en el año x.

Ensayo	Población	Edad (x)	VOL _{50%} (m ³) en VOL	VOL _{5x50%} (m ³)	Pérdida de VOL (m ³)	Pérdida de VOL (%)	N° fp en 20% al año 5
CL104	2	2		0,1683	0,0139	7,6	2
		3	0,1822	0,1791	0,0031	1,7	0
		4		0,1819	0,0003	0,2	0
TB102	1	2		0,3682	0,0158	4,1	0
		3	0,3840	0,3783	0,0057	1,5	0
		4		0,3834	0,0006	0,2	0
TB103	2	2		0,2440	0,0078	3,1	1
		3	0,2518	0,2486	0,0032	1,3	0
		4		0,2504	0,0014	0,6	0
CL113	2	2		0,2116	0,0135	6,0	3
		3	0,2251	0,2196	0,0055	2,4	0
		4		0,2236	0,0015	0,7	0
TB112	1	2		0,1657	0,0120	6,8	2
		3	0,1777	0,1736	0,0041	2,3	0
		4		0,1749	0,0028	1,6	0

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó.
Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

En la selección indirecta de VOL en base a sus componentes (DAP y HT) se observó nuevamente que las pérdidas de volumen por seleccionar indirectamente son menores a partir del año 3, siendo menor a 2,5% para DAP/VOL y 3,5% para HT/VOL (Cuadro 14). Por otro lado, el número de familias afectadas dentro del 20% superior en VOL al año 5 fue nulo (0%) seleccionando por DAP y HT al año 4. Mientras que en el año 3 se observó que el número de familias afectadas fue de 8,3% para DAP y HT, en tanto que en el año 2 afectó entre el 8,3 a 30% para DAP y de 8,3 a 23% para HT.

Cuadro 14. Comportamiento del VOL al seleccionar en base a DAP y HT según la edad de selección (Edad x), ensayo y población, aplicando el criterio 2 (eliminación del 50% de las familias). Siendo VOL5 medias del 50% de las familias al año 5; VOL5x en DAP y VOL5x en HT media al año 5 del 50% de las familias no eliminadas para DAP y HT en el año x; S, diferencial de selección y el % porcentaje correspondiente; N° fp, número de familias perdidas con la eliminación en el 20% mejor al año 5.

Ensayo	Población	Edad (x)	N° familias en 20%	VOL5 ₅₀ % (m ³) en VOL	DAP			HT			N° fp en 20% al año 5	
					VOL5x ₅₀ % (m ³) en DAP	Pérdida en VOL (m ³)	Pérdida en VOL (%)	N° fp 20% al año 5	VOL5x ₅₀ % (m ³) en HT	Pérdida en VOL (m ³)		Pérdida en VOL (%)
CL104	2	2	12	0,1822	0,1693	0,0129	7,1	0	0,1720	0,0102	5.6	1
		3			0,1777	0,0045	2,5	1	0,1777	0,0045	2.5	1
		4			0,1813	0,0009	0,5	0	0,1795	0,0027	1.5	0
TB102	1	2	12	0,3840	0,3681	0,0159	4,1	2	0,3667	0,0173	4.5	1
		3			0,3747	0,0093	2,4	1	0,3707	0,0133	3.5	1
		4			0,3803	0,0037	1,0	0	0,3764	0,0076	2.0	0
TB103	2	2	13	0,2518	0,2433	0,0085	3,4	0	0,2404	0,0114	4.5	3
		3			0,2468	0,0050	2,0	0	0,2462	0,0056	2.2	0
		4			0,2498	0,0020	0,8	0	0,2483	0,0035	1.4	0
CL113	2	2	10	0,2251	0,2040	0,0211	9,4	3	0,2177	0,0074	3.3	1
		3			0,2209	0,0042	1,9	0	0,2213	0,0038	1.7	0
		4			0,2245	0,0006	0,3	0	0,2211	0,0040	1.8	0
TB112	1	2	9	0,1777	0,1667	0,0110	6,2	2	0,1722	0,0055	3.1	1
		3			0,1746	0,0031	1,7	0	0,1728	0,0049	2.8	0
		4			0,1756	0,0021	1,2	0	0,1756	0,0021	1.2	0

CL104, CL113: Cerro Largo; TB102, TB103, TB112: Tacuarembó. Población 1, Universidad de Florida; Población 2, Pomera Maderas

2.6 DISCUSIÓN

Las ganancias genéticas están influenciadas por la intensidad de selección, la heredabilidad del carácter y la desviación estándar fenotípica (Falconer, 1989). Según Weng et al. (2007) estos parámetros no son fijos si no que varían principalmente de acuerdo con la población evaluada, lo cual puede ser verificado en los diferentes ensayos analizados en este trabajo. Por eso es importante analizar los ensayos genéticos correctamente, a fin de mejorar la toma de decisiones dentro del programa de mejoramiento genético. Estas decisiones generan un mayor impacto dentro del primer ciclo de mejora, en el cual las ganancias genéticas son obtenidas relativamente de forma más fácil. Además, se debe tener en cuenta que sobre ellas se fundamentará el avance de las siguientes generaciones (Zobel y Talbert, 1988).

Por otro lado, la varianza ambiental forma parte de la varianza residual presente en los estudios genéticos, la cual reduce la precisión de los mismos y afecta la estimación de los parámetros (Falconer, 1989). Este efecto se vio reflejado en la variación de los parámetros ensayo-ensayo especialmente en la heredabilidad (h^2) de las variables estudiadas (DAP, HT y VOL). Todos los ensayos presentaron h^2 que se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para poblaciones de medios hermanos de *Eucalyptus* de 1 a 6 años, DAP 0,08 a 0,50, HT 0,08 a 0,071 y VOL 0,08 a 0,50 (Da Costa et al., 2015; Miranda et al., 2015; Mora, 2006; Balmelli, 2001; Kageyama y Vencovsky, 1983). Sin embargo, un ensayo (CL113) presentó a partir del año 3 una alta h^2 para DAP ($\geq 0,66$), HT ($\geq 0,72$) y VOL ($\geq 0,59$). Esto pudo deberse a un menor efecto micro-ambiental dentro del ensayo por estar ubicado en una zona del campo más homogénea, lo cual generó una menor varianza ambiental. Si bien la h^2 promedio aumentó con los años, fue posible encontrar valores altos de h^2 en edades previas al año 5, estas h^2 en variables de crecimiento con bajo control genético pueden ser aprovechadas para optimizar la ganancia genética (White, Adams, Neale, 2007) Por otro lado, las relativamente bajas h^2 obtenidas en los demás ensayos no representan una limitante para obtener ganancias en poblaciones de polinización abierta de *E. grandis*, ya que es posible generar

mayores ganancias genéticas en ciclos posteriores aplicando diferentes métodos de selección como la selección de los mejores árboles dentro de las mejores familias e índices de selección (Zobel y Talbert, 1988; Kageyama y Vencovski, 1983).

La presencia de interacción genotipo por ambiente (IGA) en la población 2 para DAP y VOL pudo haber estado influenciada principalmente por la fuente de semilla. La población 2 estuvo formada por material seleccionado en diferentes fuentes (Brasil, Argentina, Uruguay, Paraguay, EUA), lo cual pudo haber generado una mayor variación en el comportamiento de las progenies, en tanto que la población 1 tuvo una sola fuente (EUA). La ausencia de IGA significativa en la población 1 permitiría hacer selecciones familiares o de individuos dentro de familias, estas selecciones podrán ser utilizadas en ambas localidades.

Las correlaciones genéticas y fenotípicas edad-edad por ensayo fueron positivas y altas, con un incremento a medida que disminuye la diferencia con la edad objetivo. Así mismo, fueron altas y positivas las correlaciones entre las variables de crecimiento DAP/HT, DAP/VOL y HT/VOL. Estas correlaciones genéticas edad-edad reflejan el potencial de la selección temprana de *E. grandis* en poblaciones de medios hermanos. Adicionalmente la mejor correlación entre DAP/VOL (Zimback et al., 2011; Ignacio-Sánchez et al., 2005; Balmelli, 2001) permitiría en caso de ser necesario una selección por DAP para mejorar el VOL (selección indirecta), lo cual generaría una reducción en el tiempo de medición y por ende en el costo de medición de los ensayos. El DAP es la variable más fácil y precisa de medir en una población forestal.

El porcentaje de ganancia por unidad de tiempo (%G/año) presentó valores altos en años previos al año objetivo. Si bien presentó variaciones por ensayo se puede considerar aplicar una selección por DAP y VOL a partir del año 3, y de esta forma maximizar las ganancias por unidad de tiempo. En tanto que si se seleccionara por HT la selección podría realizarse a partir del año 2. El VOL presentó los mayores valores de %G/año, coincidiendo con Moraes et al. (2014), que expresa que esta es la

variable que mejor representa las ganancias comerciales. Mientras que HT presentó mayores valores de %G/año que DAP, lo cual coincide con lo descrito por Kageyama y Vencovsky (1983) para una población de medios hermanos de *E. grandis* en Brasil.

La eficiencia de selección fue diferente para cada ensayo, tres de ellos presentaron valores de E superiores a 1 en años previos al año 5 al seleccionar por DAP, HT y VOL, indicando la posibilidad de seleccionar en edades tempranas de forma eficiente dependiendo de la población de *E. grandis* utilizada. La HT presentó una eficiencia de selección (E mayor a 1) para las edades de 2 a 4 años en todos los ensayos, mientras que fue variable según los diferentes ensayos para DAP y VOL. Soria, Basurco y Toval (2001), aplicando la misma fórmula de E de Lambeth (1980), obtuvieron valores de E superiores (1,30 – 1,56) para HT y DAP al año 3, para una población de medios hermanos de *E. globulus* spp. *globulus*. Si bien el valor de E fue variable por ensayo, los altos valores de E en los primeros años de crecimiento demuestra el potencial de seleccionar árboles en edades tempranas y la posibilidad de acortar la fase de evaluación del material genético. Este análisis debería complementarse con un análisis de costo-beneficio.

La aplicación de los criterios de selección (selección del 20% de familias y eliminación del 50% de las familias) para DAP, HT, VOL, DAP/VOL y HT/VOL demostraron que es posible aplicar una selección familiar temprana sin afectar de forma considerable la ganancia genética que se obtendría en el año objetivo. A su vez, no tomar en cuenta para el análisis el 50% inferior de las familias a partir del año 3 no afectó al 20% de las mejores familias al año 5. Es decir que sería posible realizar la aplicación combinada del criterio 1 y 2, manteniendo ganancias genéticas y facilitando las tareas operativas del programa de mejora genética (reduciendo costos y tiempo) al no incluir el 50% inferior del material a evaluar.

En conclusión, los parámetros genéticos, los porcentajes de G/año y E para DAP, HT y VOL presentaron variaciones entre ensayos, pero los valores obtenidos

indican que existe un buen potencial de selección temprana previa al año 5 en poblaciones de *E. grandis*. Es posible realizar una selección por DAP y VOL en los años 3 y 4, y por HT a partir del año 2. Si bien fue posible realizar selecciones indirectas de VOL en base a sus componentes, los mayores porcentajes de G/año se obtuvieron en la selección directa de VOL. En base a estos resultados se acepta la hipótesis de este trabajo, es decir que es posible seleccionar familias de medios hermanos de *E. grandis* antes del año 5, y acelerar de esta forma la fase de evaluación del material, a fin de reducir el ciclo de mejora en un programa de mejoramiento para madera sólida y maximizando las ganancias por unidad de tiempo.

2.7 AGRADECIMIENTOS

A la empresa Weyerhaeuser Productos S.A./Lumin® por la financiación de este estudio. Al Ing. Ftal. (PhD) Robert Purnell y al Ing. Agr. (MsC) Juan Pedro Posse por el apoyo en la realización de este trabajo.

2.8 BIBLIOGRAFÍA

Balmelli, G. (2001). *Estimación de parámetros genéticos para características de crecimiento en Eucalyptus grandis: algunas implicaciones para el mejoramiento genético y para la producción de semilla comercial*. Serie Técnica n° 121. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 11p.

Borralho, N. M., Cotterill, P. P., Kanowski, P. J. (1992). Genetic control of growth of *Eucalyptus globulus* in Portugal. *Silvae Genetica* 41(2), 70–77.

Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., Aunchayna, R., Bidegain, M. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. Serie Técnica

n° 193. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Uruguay. 34p.

Da Costa, R. B., Martinez, D. T., Silva, J. C., Almeida, B. C. (2015). Variabilidade e ganhos genéticos com diferentes métodos de seleção em progênies de *Eucalyptus camaldulensis*. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 58(1), 69-74.

DGRN Dirección Nacional de Recursos Naturales (2017). *Descripción de grupos de suelos CONEAT*. Recuperado de: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/grupos-de-suelos-e-indices-de-productividad-coneat>

Falconer, D. S. (1989). *Introduction to quantitative genetics* (3rd edn). England: Longman Scientific & Technical.

Farfán, E. G., Jasso, J., López, J., Vargas, J., Ramírez, C. (2002). Parámetros genéticos y eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25 (3), 239-246.

Hernández, E., López, J., Sánchez, V., Vargas, J. J., Salazar, J. G. (2016). Early performance and genetic gain of *Cedrela odorata* families from wide-ranging sites in México. *Journal of Tropical Forest Science* 28 (4), 446–456.

Holland J.B. 2006. Estimating Genotypic Correlations and Their Standard Errors Using Multivariate Restricted Maximum Likelihood Estimation with SAS Proc MIXED. *Crop Science* 46, 642-654.

- Ignacio-Sánchez, E., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Borja de la Rosa, A. (2005). Parámetros genéticos del crecimiento y densidad de Madera en edades Juveniles de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. *Agrociencia* 39 (4), 469-479.
- Kageyama, P. Y., Vencovsky, R. (1983). Variação genética em progênes de uma população de *Eucalyptus grandis* (HILL) Maiden. *IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais)* 24, 9-26.
- Lambeth, C. (1980). Juvenile-mature correlations in pinaceae and implications for early selection. *Forest Science* 26 (4), 571-580.
- Miranda, A. C., Moraes, M. L., Silva, P. H., Sebbenn, A. M. (2015). Ganhos genéticos na seleção pelo método do índice multi-efeitos em progênes polinização livre de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Scientia Forestalis* 43 (105), 203-209.
- Mora, F. (2006). Heredabilidad y valor genético (REML/BLUP) en genotipos de un eucalipto tolerante a la sequía, en el norte de Chile. *Ciencia Florestal* 16 (2), 145-151.
- Mora, F., Pupim-Junior, O., Scapim, C. A. (2007). Predicción del efecto de cultivares de algodón en la presencia de interacción genotipo-ambiente. *Ciencia e Investigación Agraria* 34 (1), 13-21.
- Moraes, C. B., Brizolla, T. F., Teixeira, L. G., Zimback, L., Tambarussi, E. V., Chaves, R., Teixeira, M. L., Mori, E. S. (2014). Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção de árvores de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* 42 (104), 623-629.

- Soria, F., Basurco, F., Toval, G. 2001. *Evolución de parámetros genéticos y eficiencia de selección precoz, para rasgos de crecimiento en Eucalyptus globulos spp. globulus.* Recuperado de: <https://www.congresoforestal.es/index.php?men=71>.
- Weng, Y. H., Tosh, K. J., Park, Y. S., Fullarton, M. S. (2007). Age-related Trends in Genetic Parameters for Jack Pine and their implications for early selection. *Silvae Genetica* 56 (5), 242 – 252.
- White, T. L., Adams, W. T., Neale, D. B. (2007). *Forest genetics*. Cambridge: Cabi International.
- Wu, H. X. (1998). Study of early selection in tree breeding. *Silvae Genetica* 47 (2-3), 146-155.
- Yang, R. C. (2002). Likelihood-Based analysis of genotype-environment interactions. *Crop Science* 42, 1434-1440.
- Zimback, L., Mori, E. S., Brizolla, T. F., Chaves, R. (2011). Correlações entre caracteres silviculturais durante o crescimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista do Instituto Florestal* 23 (1), 57-67.
- Zobel, B., Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México: Limusa.

3. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GENERALES

Sean probado las hipótesis planteadas para la selección temprana en poblaciones de medios hermanos de *E. grandis*. Por lo tanto, se concluye que:

- Existe una dependencia interanual del crecimiento y sus componentes en años previos al año 5, que permite realizar una selección temprana en poblaciones de medios hermanos de *E. grandis*, lo cual permitiría acortar la fase de prueba del material genético y maximizar las ganancias por unidad de tiempo.
- Se observó una interacción genotipo por ambiente (IGA) significativa en una sola población y en las variables diámetro a la altura del pecho (DAP) y volumen (VOL). Para estas características en dicha población la selección familiar debería ser realizada por localidad. Mientras que para la población sin IGA se podrían realizar análisis conjuntos de los ensayos.
- Las correlaciones genéticas y fenotípicas aumentan entre el año 2 y el año 5, siendo mayor a 0,70 a partir del año 3 para las tres variables. La variable DAP presentó las mejores correlaciones con el VOL, lo que permitiría hacer selecciones indirectas.
- Los valores de heredabilidad, de ganancias genéticas correlacionadas y de eficiencia de selección demuestran que es posible seleccionar a la edad de 3 y 4 años.
- Es posible seleccionar las mejores familias dentro de cada ensayo aplicando diferentes criterios de selección en los diferentes años previos al año 5, sin afectar a las mejores familias esperadas para el año 5.

4. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Andreoni, MI, Bussoni, A. 2014. Evaluación económica de dos programas de mejoramiento genético en *Eucalyptus grandis*. Agrocienca Uruguay, 18 (1): 153-162.
- Balmelli, G. 2001. Estimación de parámetros genéticos para características de crecimiento en *Eucalyptus grandis*: algunas implicaciones para el mejoramiento genético y para la producción de semilla comercial. Serie Técnica n° 121. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 11p.
- Balmelli, G, Kubota, M. 2002. Estimación de parámetros genéticos en la segunda generación de *Eucalyptus grandis* y su utilización para el manejo de la población multipropósito. Serie Aftercare Forestal INIA-JICA n° 4. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 11p.
- Bennadji, Z. 2001. Área Forestal del INIA: situación de la investigación para la región de Areniscas de Tacuarembó y Rivera, Capítulo 2: Situación de la investigación forestal para la región de areniscas de Tacuarembó y Rivera. Área forestal del INIA. Seminario de actualización en tecnologías forestales para areniscas de Tacuarembó y Rivera, 2001, Tacuarembó, UY. Serie Técnica n° 123). Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 39-48p.
- Bennadji, Z, Uetsuki, Y. 2001. Aftercare forestal INIA - JICA (2000-2002): contenido y avances Tacuarembó (Uruguay). Serie Actividades de Difusión 251. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 5p.
- Borralho, NM, Cotterill, PP, Kanowski, PJ. 1992. Genetic control of growth of *Eucalyptus globulus* in Portugal. *Silvae Genetica* 41(2), 70-77.

- Boscana, M, Boragno, L. 2017. Estadísticas forestales 2017: Extracción, producción, consumo, mano de obra, comercio exterior. Montevideo: Dirección General Forestal (DGF), MGAP. 67.
- Brussa, CA. 1994. *Eucalyptus*: especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo: Hemisferio Sur. 328.
- FAO. 2006. Global planted Forests thematic study: results and analysis, by A. del Lungo, J. Ball and J. Carle. Roma: FAO. 178 p. (Planted Forests and Trees working paper 38).
- Fonseca, SM, Resende, MD, Alfenas, A, Guimarães, LM, Assis, T, Grattapaglia, D. 2010. Manual práctico de melhoramento genético do eucalipto. Viçosa: Ed. UFV. 200.
- Lambeth, C. 1980. Juvenile-mature correlations in pinaceae and implications for early selection. *Forest Science* 26 (4), 571-580.
- Moraes, CB, Brizolla, TF, Teixeira, LG, Zimback, L, Tambarussi, EV, Chaves, R, Teixeira, ML, Mori, ES. 2014. Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção de árvores de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* 42 (104), 623-629.
- Myburg, AA, Potts, BM, Marques, CM, Kirst, M, Gion, JM, Grattapaglia, D, Grima-Petternatti, J. 2007. Eucalypts. En: Kole, C (Eds.). *Forest trees: mapping and molecular breeding in plants*. Berlín: Springer. 115-160.
- Pereira, AB, Marques Jr., OG, Ramalho, MAP, Althoff, P. 1997. Eficiência da seleção precoce em famílias de meios irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. avaliadas na região noroeste do estado de Minas Gerais. *Cerne* 3 (1), 67-81.

White, TL, Adams, WT, Neale, DB. 2007. Forest genetic. Cambridge: Cabi International. 682.

Wu, HX. 1998. Study of early selection in tree breeding. *Silvae Genetica* 47 (2-3), 146-155.