

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CRECIMIENTO, ANATOMÍA DE MADERA Y PARÁMETROS GENÉTICOS EN UN ESTUDIO DE PROGENIES DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

ESTHER PAREDES DÍAZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO; EDO. DE MÉXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Esther Paredes Díaz, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Jesús Jasso Mata, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis CRECIMIENTO, ANATOMÍA DE MADERA Y PARÁMETROS GENÉTICOS EN UN ESTUDIO DE PROGENIES DE Eucalyptus grandis Hill ex Maiden y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 12 de Julio de 2017

PAREDES DIAZ ESTHER

Firma del
Alumno (a)


Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **"Crecimiento, anatomía de madera y parámetros genéticos en un estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden"** realizada por la alumna: **Esther Paredes Díaz**, con la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JESÚS JASSO MATA

ASESOR



DR. HÉCTOR M. DE LOS SANTOS POSADAS

ASESOR



DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA

ASESOR



DR. DIONICIO ALVARADO ROSALES

ASESOR



DR. ÁNGEL VILLEGAS MONTER

Montecillo, Texcoco; Estado de México, julio, 2017

CRECIMIENTO, ANATOMÍA DE MADERA Y PARÁMETROS GENÉTICOS EN UN ESTUDIO DE PROGENIES DE *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN

Esther Paredes Díaz, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Se estableció un ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis* con 49 familias de pedigrí incompleto. La necesidad de definir una estrategia de mejoramiento genético, llevó al estudio del crecimiento, la calidad de la pulpa para papel y los parámetros genéticos en las características de crecimiento, por lo que se obtuvieron la tasa de crecimiento y el índice altura-forma (AF) para cada familia; se analizaron la variación de la densidad básica (Db) y las dimensiones de las fibras en sentido radial, además de calcular los índices de calidad de pulpa para papel, también se estimó el grado de control genético de las características de crecimiento: Altura (A), diámetro normal (DN) y a la base (DB) y volumen (V) a los 4, 5 y 6 años con datos de árboles sanos; las correlaciones genéticas y fenotípicas, así como la respuesta a la selección en volumen a los 6 años (V6). Como resultado se observó diferencia entre familias en el crecimiento. Once familias fueron superiores en D y V; dos lo fueron en D y AF mientras que tres lo fueron en V y AF, de las cuales solo la familia 27 está incluida en los tres grupos. La Db de la madera fue de 0.41 g cm^{-3} en promedio y junto con las dimensiones de las fibras, se observó una variación radial con una tendencia de incremento hacia la corteza. Esta tendencia y las fibras cortas ($884.6 \mu\text{m}$) de paredes delgadas ($3.3 \mu\text{m}$) observadas, determinan la juvenilidad de la madera. Además, el coeficiente de rigidez (0.33 a 0.42) y la relación de Runkel (0.53 a 0.85) determinan que es buena para la producción de pulpa para papel. La heredabilidad tendió a ser mayor en volumen y menor en altura en los años de evaluación. La heredabilidad de V6 a nivel de media de familias fue mayor (0.57) que en lo individual (0.23) y dentro de familias (0.18). Las altas correlaciones genéticas (1.0) determinan que es posible mejorar todas las características al seleccionar con base en una característica. Las altas correlaciones fenotípicas (1.0) indican que es posible identificar los mejores genotipos con la selección de los árboles por sus dimensiones. Se obtuvo una buena respuesta relativa esperada (17.6 %) y buena variación en la base genética (73.5 % de familias seleccionadas) para V6 con la selección del 20.0 % de los árboles sanos con índice combinado (población para huerto semillero, para abastecer los programas de plantación y establecer una prueba de familias F_2). Aunque la selección dentro de familias generó menor respuesta esperada (9.3 %), ofreció mayor variación en la base genética (100.0 % de familias seleccionadas), por tanto, puede ser útil en ciclos posteriores de mejoramiento.

Palabras clave: Huerto semillero, índice combinado, base genética, índices de pulpa índice altura-forma.

GROWTH, ANATOMY OF WOOD AND GENETIC PARAMETERS IN AN ESSAY OF
PROGENIES OF *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN

Esther Paredes Díaz, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

A progeny test of *Eucalyptus grandis* with 49 incomplete pedigree was established. The need to define a strategy of genetic improvement led to the study of growth, paper pulp quality and genetic parameters in growth characteristics, so that the growth rate and the height-stem shape index (AF) for each family; basic density (Db) and fiber dimensions through the diameter, moreover the index for pulp quality; the genetic control for growth characteristics like height (A), diameter at the breast (DN) and the diameter at the base (DB) and volume (V) was estimated at 4, 5 and 6 years for healthy trees; genetic and phenotypic correlations as well as the selection response for volume at 6 years (V6) were calculated. As a result differences in growth between families was observed. Eleven families were superior in D and V; two families were the best for D and AF while three families were superior in V and AF of which only family 27 is included in all three groups. The average Db was 0.41 g cm⁻³. The Db and fiber dimensions had differences among longitudinal segments of the diameter and tend to increment toward the bark. This tendency and the short fibers (884.6 μm) with thin walls (3.3 μm) define that the wood was in the juvenile stage period. Besides, the stiffness rate (0.33 a 0.42) and the Runkel ratio (0.53 a 0.85) defined that wood is good for pulp production. The heritability was larger in volume than in height through the years of evaluation. The heritability in V6 by family was larger (0.57) than for individual (0.23) and intra-familial levels (0.18). The high genetic correlations (1.0) determine that is possible to improve all the characteristics when selecting based on one of them. The high phenotypic correlations (1.0) means that the best trees (genetically) can be selected by their dimensions. The genetic gain was good (23.7 %) and the genetic base was good too (73.5 % of the selected families) for selection in V6 of 20.0 % of healthy trees by combined index (population for seed orchard to supply plantation programs and to establish an F₂ family test). In spite that genetic gain for intra-familial selection (9.3 %) was smaller than the other methods, it offered the largest more variation in the genetic base (100.0 % of the selected families), then this population can be useful for future breeding cycles.

Key words: Seed orchard, combined index, genetic base, pulp index, height-stem shape index.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

Los millones de mexican@s quienes a través de sus impuestos han financiado mis estudios de doctorado.

Mi madre, Ma. Luisa Díaz E. por todo su amor, comprensión, consejos y apoyo incondicional en todo momento.

Mis hermanos Beatriz y Fabián, así como a mis sobrinas Natalia y Betsie, porque siempre están dispuestos a apoyarme cuando los necesito.

Benito González Jiménez, mi compañero de vida, por ser el pilar en el que encuentro el apoyo para mantenerme en pie, aún en los momentos más difíciles.

Mis amigas más cercanas, Liliana Muñoz Gutiérrez y Diana Córdoba Rodríguez, por compartir sus conocimientos, experiencia, consejos y amistad, mil gracias.

AGRADECIMIENTOS

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados por las facilidades otorgadas para lograr mi formación profesional.

Los miembros de mi Consejo Particular por su apoyo, tiempo, dedicación y palabras de aliento, Dr. Dionicio Alvarado Rosales, Dr. Ángel Villegas Monter, Dr. Héctor de los Santos Posadas, Dra. Ma. Amparo M. Borja de la Rosa, pero sobre todo, por su guía en cada etapa de esta investigación, al Dr. Jesús Jasso Mata, quien es un ejemplo de fortaleza y constancia.

Dr. Jesús Vargas Hernández, por su paciencia y apoyo desinteresado otorgado en el proceso de cálculo e interpretación de los resultados del Capítulo III de esta tesis y al Dr. Javier López Upton, quien también me auxilió en momentos clave.

La Universidad Autónoma Chapingo, al laboratorio de Anatomía y Tecnología de la madera, especialmente a la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa, por las facilidades otorgadas para el análisis anatómico que forma parte de esta investigación y el apoyo técnico de Álvaro Cebrero Luna y Adriana Acosta García.

Al Ing. Víctor Moya, la Ing. Abigail Pavón y la empresa Plantaciones de Tehuantepec (PLANTEH), S.A. de C.V., por haber permitido y apoyado el desarrollo del trabajo de campo y su hospitalidad en nuestras visitas para la toma de datos. Así como facilitarnos el ingreso al estudio de progenies.

Al M.C. Leonel Harrand, por facilitarnos la semilla seleccionada de las familias de Argentina, parte del ensayo de progenies.

A quien estoy infinitamente agradecida, Sr. Luis Méndez Hidalgo, por su apoyo en todas las actividades de campo y transporte a Lombardo de Caso.

A los compañeros brigadistas habilitados: Benito, Fabián, Juan, Osvaldo, Carmen y Dolores por el apoyo en la toma de datos, aún bajo condiciones climáticas desfavorables.

Al personal del Postgrado en Ciencias Forestales, por su amabilidad y asistencia en los trámites requeridos durante mi formación, en especial a Beatriz Cano Alvarado y Guadalupe Sánchez, Vázquez, muchas gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
LITERATURA CITADA.....	4
CAPÍTULO I. CRECIMIENTO EN DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN EN PROGENIES DE <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden EN EL ESTADO DE OAXACA.....	7
1.1. RESUMEN	7
1.2. ABSTRACT	8
1.3. INTRODUCCIÓN	9
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
1.6. CONCLUSIONES	35
1.7. LITERATURA CITADA.....	36
CAPITULO II. ANATOMÍA DE MADERA DE <i>E. grandis</i>	44
2.1. RESUMEN.....	44
2.2. ABSTRACT	45
2.3. INTRODUCCIÓN	46
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
2.6. CONCLUSIONES	64
2.7. LITERATURA CITADA.....	65
CAPÍTULO III. PARAMETROS GENÉTICOS DE CRECIMIENTO PARA UN ENSAYO DE PROGENIES DE <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	73
3.1. RESUMEN	73
3.2. ABSTRACT	74
3.3. INTRODUCCIÓN	75
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	82

3.6. CONCLUSIONES 96
ANEXO A..... 97
ANEXO B..... 98
3.7 LITERATURA CITADA..... 100

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Nomenclatura de familias para cada fuente de germoplasma del estudio de progenies de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	13
Cuadro 1.2. Clasificación de la forma del fuste con base en su diferencia en diámetro de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	18
Cuadro 1.3. Familias con índice combinado altura-forma del fuste positivo de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	33
Cuadro 2.1. Número de familia dentro de fuente en el estudio de progenies de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	49
Cuadro 2.2. Árboles seleccionados para análisis de madera de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	50
Cuadro 2.3. Prueba de tukey de las dimensiones de las fibras y densidad básica por familia y sección en <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	57
Cuadro 2.4. Prueba de tukey para índices de calidad de pulpa por familia y sección en <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	62
Cuadro 2.5. Correlación entre características anatómicas, índices de calidad de pulpa y densidad básica a los 6 años en <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	63
Cuadro 3.1. Componentes de varianza, coeficiente de variación aditiva y fenotípica y promedio de las características evaluadas a nivel individual en <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	83
Cuadro 3.2. Heredabilidad individual, medias de familias y dentro de familias y error estándar, para características de crecimiento de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	84
Cuadro 3.3. Correlaciones genéticas (sobre la diagonal) y fenotípicas (bajo la diagonal) para características de crecimiento, en 49 familias de polinización libre de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	87
Cuadro 3.4. Comparación de la respuesta a la selección en volumen a los 6 años (%) de diferentes métodos para <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.....	89

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en altura total (m), respecto a FP (49) y Der. Proyección del crecimiento promedio en altura de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 20
- Figura 1.2. Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en diámetro normal (cm), respecto a FP (49) y Der. Proyección del crecimiento promedio en diámetro normal de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 23
- Figura 1.3. Izq. Distribución de las desviaciones del promedio en diámetro a la base (cm) y Der. Proyección del crecimiento promedio en diámetro a la base de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden* 26
- Figura 1.4. Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en volumen (dm³) respecto a FP y Der. Proyección del crecimiento promedio en volumen de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 28
- Figura 2.1. Extracción no destructiva de la muestra de madera de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 51
- Figura 3.1. Comparación de la representación de familias del área semillera 01 (AS01) entre métodos de selección para *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 92
- Figura 3.2. Comparación de la representación de familias del área semillera 02 (AS02) entre métodos de selección para *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 93
- Figura 3.3. Comparación de la representación de familias de los árboles plus (PLUS) entre métodos de selección para *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*..... 93
- Figura 3.4. Comparación de la representación de familias de los árboles de Argentina (ARG) entre métodos de selección para *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden* 94

INTRODUCCIÓN GENERAL

Eucalyptus grandis Hill ex Maiden es uno de los más de 500 miembros de la familia myrtacea. El nombre del género viene del griego *eu*, bien y *kalypteim*, cubierto (Sánchez-Granados & López-Ríos, 2007), debido a que su botón floral presenta un opérculo o pestaña que cae cuando florece (Bigneli & Dunlop, 1998).

Se distribuye de manera natural casi continua en la zona costera de Queensland y Nueva Gales del Sur, desde los 33 a los 26 ° L. S., luego se ausenta y forma poblaciones aisladas hasta cerca de los 18 y 16° L. S. Se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1 100 m, por lo que las condiciones ambientales tienen rango de 14 a 22 °C de temperatura media anual, mínimas de -1 a 11°C y máximas de 25 a 31°C, mientras que la precipitación va desde 690 a 2 480 mm; y aunque crece en distintos tipos de suelo, en general se encuentra sobre suelos moderadamente fértiles y de poca pendiente (Eldridge, Davidson, Harwood & Van Wyk, 1994), pero, también en la parte alta de los cerros, ya que no tolera la inundación (Betancourt, 1983).

La facilidad de manejo en vivero, rápido crecimiento, buena forma (Turnbull & Pryor, 1984), y las propiedades de la madera la hacen deseable para manejo intensivo en plantaciones para la producción de madera aserrada, postes de mina, leña, carbón (Campinhos, 1999; Turnbull, 1999), material para construcción de viviendas con sistemas livianos, muebles rústicos y de calidad, así como panel de láminas y revestimientos (Sánchez, 2012), aunque su principal destino es la pulpa para papel (Du Plessis & Kotze, 2011; Nichols, Smith, Grant & Glencross, 2010).

Esta especie se estableció fuera del rango natural en las zonas tropicales y subtropicales del mundo (Eldridge et al., 1994); aunque en las tierras bajas las plantaciones son susceptibles a enfermedades (Betancourt, 1983).

Las principales plantaciones se encuentran en Brasil y Sud África, y en menor superficie en Argentina, Australia, India, Uruguay y Zimbabue y otros países (FAO, 1981). En México, se introdujo con fines comerciales con apoyo gubernamental desde los 60's. El programa denominado "Programa de Plantaciones Forestales Comerciales" (PRODEPLAN) en 1997 apoyó el establecimiento de plantaciones en los estados de Oaxaca y Veracruz propiedad de la empresa Plantaciones de Tehuantepec S.A. de C.V. (Comisión Nacional Forestal, 2001).

En Santiago Yaveo, Oaxaca se inició en 2006 un programa de mejoramiento genético para obtener madera sólida y pulpa para papel, así como reducir la incidencia del cancro *Crysoporthe* en *Eucalyptus* con el establecimiento de dos áreas semilleras de *E. grandis* y dos de *Eucalyptus urophylla*, las áreas de cada especie variaron en la densidad, aproximadamente 100 árboles ha⁻¹ para el área uno y alrededor de 150 árboles ha⁻¹ en el área dos, así como la selección de 200 árboles superiores para cada especie en las plantaciones de la empresa. A principios del 2008 se estableció un ensayo de progenies de *E. grandis* (EPG) para probar 49 familias producto de la polinización libre de tres fuentes locales, las dos áreas semilleras y árboles plus, y de una fuente externa que representa la inclusión de material mejorado de Argentina, supuestamente tolerante al cancro, en el EPG.

El mejoramiento genético forestal es una herramienta complementaria a la silvicultura que permite obtener productos de mejor calidad, incrementar el volumen de producción

en menor tiempo, y obtener plantaciones resistentes a plagas, enfermedades y ambientes adversos (Zobel y Talbert, 1988). A pesar de ser susceptible al cancro del eucalipto, existe variación en respuesta a la enfermedad (van Heerden, Amerxon, Preisig, Wingfield & Wingfield, 2005; van Zyl & Wingfield, 1999), lo que permite hacer selección para reducir la incidencia.

La domesticación y mejora es un proceso que tiene como base la selección de los mejores genotipos y su cruzamiento, con el propósito de incrementar la producción de individuos con características deseables y se lleva a cabo como una parte operacional del manejo forestal intensivo, sin embargo, en nuestro país existe un número limitado de proyectos encauzados a estos fines (Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados [CONAFOR-CP], 2011) y en este caso se describe el presente estudio llevado a cabo en el Estado de Oaxaca, México:

Capítulo I.- Se enfocó en la selección de los mejores genotipos por forma y crecimiento, por lo que se obtuvieron las curvas de crecimiento con las evaluaciones del año 1 al 6.5, para identificar las familias de mejor desempeño en altura, diámetro normal, diámetro a la base y volumen, así como índice altura-forma.

Capítulo II.- Se analizó la densidad básica, las características anatómicas de las fibras y se estimaron los índices de calidad de pulpa para estudiar su variación radial y entre individuos

Capítulo III.- Se estimaron parámetros genéticos a nivel individual, dentro de familias; respuesta a la selección del 20.0% de los mejores genotipos por tres métodos para transformar el ensayo en un huerto semillero sexual; de manera complementaria se analizó la variación en la base genética al aplicar cada método.

LITERATURA CITADA

- Betancourt, B. A. *Silvicultura especial de árboles maderables tropicales*. Habana, Cuba: Editorial Científico-Técnica.
- Bigneli, C. M., Dunlop, E. (1998). Volatile leaf oils of some South-western and Southern Australian species of the genus *Eucalyptus*. *Flavor and Fragrance Journal*, 13(2):131-139.
- Campinhos, E. (1999). Sustainable plantations of high-yield *Eucalyptus* trees for production of fiber: The Aracruz case. *New Forest*, 17, 129-143. doi: 10.1007/978-94-017-2689-4
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2001). Inventario nacional forestal. PRODEPLAN. Jalisco, México: Autor.
- Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados (CONAFOR-CP). (2011). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Jalisco, México: Autor.
- Du Plessis, M. & Kotze, H. (2011). Growth and yield models for *Eucalyptus grandis* grown in Swaziland. *Southern Forest*, 73(2), 81–89. doi: 10.2989/20702620.2011.610873
- Eldridge, K., Davidson, J., Harwood, C. & Van Wyk, G. (1994). *Eucalypt domestication and breeding*. Oxford, EUA: Calderon Press.
- FAO. (1981). *El Eucalipto en la Repoblación Forestal*. Roma, Italia: Autor

- Nichols, J. D., Smith, R. G. B., Grant, J. & Glencross, K. (2010). Subtropical eucalypt plantations in eastern Australia. *Australian Forestry*, 73(1), 53–62. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2010.10676310>
- Sánchez, A. M. M. (2012). *Caracterización de la madera del nuevo híbrido Eucalyptus grandis, Hill ex Maiden x Eucalyptus tereticornis, Smith, su aptitud de usos en Argentina*. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid. Palencia, España.
- Sánchez-Granados, D. & López-Ríos, G. F. (2007). Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2), 143-156. Obtenido de <https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/>
- Turnbull, J. W. (1999). Eucalypt plantations. *New Forest*, 17, 37–52. doi: 10.1007/978-94-017-2689-4
- Turnbull, J. W. & L. D. Pryor. (1984). Choice of species and seed source. In W. E. Hillis y G. A. Brown (Eds.), *Eucalypts for wood production* (6-65). Australia: CSIRO - Academic Press.
- Zobel, B. & Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México, D. F.: Limusa.
- Van Heerden, S. W., H. V. Amerson, O. Preisig, B.D. Winfield & M.J. Winfield. 2005. Relative pathogenicity of *Cryphonectria cubensis* on *Eucalyptus* clones differing in their resistance to *C. cubensis*. *Plant Disease*, 89(6), 659-662.
- Van Zyl, L. M. & M. J. Wingfield. (1999). Wound response of *Eucalyptus* clones after inoculation with *Cryphonectria cubensis*. *European Journal of Forest Pathology*. 29(2): 161-167. doi:10.1111/j.1439-0329.1999.tb01214.x

CAPÍTULO I. CRECIMIENTO EN DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN EN PROGENIES DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden EN EL ESTADO DE OAXACA

1.1. RESUMEN

En México se estableció en 2008 un ensayo de progenies (EPG) con germoplasma de pedigrí incompleto de 3 fuentes locales y 1 externa, previamente seleccionadas de *Eucalyptus grandis*. Con el objetivo de determinar las familias de mejor crecimiento, para transformar el EPG en huerto semillero sexual (HSS), los datos de remediciones a partir del año 1 y hasta los 6.5 años se analizaron con un modelo de efectos mixtos del tipo “Schumacher-Hall” en su forma lineal. Se estimó la tasa de crecimiento por familia y se modeló el crecimiento para un periodo de 8 años en altura total (A), en diámetro normal y a la base (DN, DB) y en volumen (V). También se obtuvo un índice combinado de altura y forma de fuste (AF) con los datos de la última lectura. Los valores promedio a los 6 años para la población fueron 25.3 m en A, 19.7 cm en DN, 22.1 cm en DB y 354.8 dm³ en V y -0.04 en el índice combinado AF. El modelo permitió identificar las mejores familias en las variables estudiadas. Las características se agruparon y la frecuencia de familias definió los criterios de selección. Las familias 12, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 38, 39, 40 y 43 (11) fueron superiores en DN y V; la 14 y la 27 (2) superiores en DN y AF, y las 10, 27 y 42 (3) superiores en V y AF, es decir, solo la familia 27 resultó incluida en los tres grupos. Estas familias son las que potencialmente deben formar parte del HSS.

Palabras clave: Modelo de efectos mixtos, curvas de crecimiento, medidas repetidas, variables dasométricas, selección familiar, índice altura-forma del fuste.

1.2. ABSTRACT

A progeny test (EPG) of incomplete pedigree was established in Mexico in 2008 with germplasm of 3 local sources and 1 external previously selected of *Eucalyptus grandis*. In order to identify the best families in growth to convert the EPG into a sexual seed orchard (HSS), annual measurements of dasometric variables at 1 to 6.5 years were analyzed with a mixed effects model of the Schumacher linearized one. The rate of growth was estimated and the growth was projected for an 8 years period in height (A), diameter at the breast (DN) and at the base (DB), and volume (V). A combined ratio of height and stem shape (AF) was obtained for each family with data from the last year. The average values for the population were 25.3 m in A, 19.7 cm in DN, 22.1 cm in DB and 354.8 dm³ in V and -0.04 in AF. The best families were identified applying the proposed model mentioned upper lines. The characteristics were applied by groups and the selection criteria were to determine frequency of families in each group. Families 12, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 38, 39, 40 and 43 (11) were superior in DN and V; 14 and 27 (2) were superior in DN and AF, and 10, 27 and 42 (3) were superior in V and AF. Then only the family number 27 was included at the three groups. Trees of these families have to be included to remain in the EPG to form part of the HSS.

Key words: Mixed effects model, growth curves, repeated measures, dasometric variables, family selection, height-stem form combined index.

1.3. INTRODUCCIÓN

Eucalyptus grandis Hill ex Maiden, especie nativa de Australia, presenta una distribución casi continua desde el sur de Queensland hasta la costa de New South Wales, entre los 26° y 32°52' L. S. y hacia el norte de esta zona se encuentran varias poblaciones dispersas a los 16° y 18° L. S. Se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1 110 m, sobre terrenos de aluvión (Granados-Sánchez & López-Ríos, 2007), moderadamente fértiles, en sitios con temperatura mínima de 2°C y máxima de 29°C y una precipitación pluvial media anual entre 1 020 y 1 780 mm (Meskimen & Francis, 2000). Debido a la utilidad de su madera (principalmente como pulpa para papel (Du Plessis & Kotze, 2011; Nichols, Smith, Grant & Glencross, 2010), para postes, leña y carbón (Turnbull, 1999), así como en la construcción y elaboración de muebles), se ha establecido fuera de su rango natural en plantaciones forestales comerciales en áreas tropicales y subtropicales del mundo aprovechando su velocidad de crecimiento (Forrester, Medhurst, Beadle & Valencia, 2010; Kojima, Yamaji, Yamamoto, Yoshida & Nakai, 2009) que implica ciclos cortos que van de los 6 a los 8 años (Gonçalves et al., 2013).

El cambio de dimensiones de los árboles se presenta como conos sobrepuestos, debido a que la división, crecimiento, diferenciación y maduración de las células que están involucradas en el crecimiento en altura y diámetro normal se ubican en distinta zona del fuste, en el meristemo primario para la primera y en el meristemo secundario para la segunda. Los árboles crecen en diámetro después de que inicia el crecimiento en altura, por lo que los árboles tienden a crecer más en su base y tienden a ser más delgados en las partes superiores (Kramer & Koslowski, 1960), por lo tanto, aquellos con mayor

crecimiento en diámetro a la base pudieran no ser deseables, ya que entonces el fuste tendería a ser cónico, sin embargo, una forma más o menos cilíndrica optimiza el espacio durante el transporte y permite obtener en el aserrío un mayor volumen por individuo.

Al relacionar el crecimiento con la edad, se forma una curva exponencial que indica un ritmo acelerado los primeros años de vida que luego se reduce gradualmente, en especies de rápido crecimiento (De los Santos-Posadas, Montero-Mata & Kanninen, 2006; Gómez-Tejero, Santos-Posadas, Fierros-González & Valdez-Lazalde, 2009; Martini, de Carvalho, dos Santos, Ribeiro & Montandon, 2016; Oliveira et al., 2016).

El incremento del rendimiento de las plantaciones comerciales es uno de los principales objetivos del mejoramiento genético forestal. La selección de los mejores genotipos y su posterior cruzamiento, en ciclos recurrentes, permite empaquetar los genes deseables en la progenie obtenida en consecuencia (White, Adams & Neale, 2007).

En su área de origen se han observado incrementos en altura que van de 1.9 a 2.8 cm año⁻¹ y en diámetro alcanza 1.6 cm año⁻¹ (Forrester & Smith, 2012). Mientras que en Costa Rica se han obtenido incrementos del orden de 4.5 a 5.3 m año⁻¹ en altura y de 3.9 a 6.1 cm año⁻¹ en diámetro normal (Mesén, Vásquez & Víquez, 2007). En tanto, para el híbrido *Eucalyptus urograndis* se tienen registros de IMA del orden de 3.2 a 6.8 m en altura y de 2.8 a 6.1 cm en diámetro en estudios realizados en Brasil y China (Martini et al., 2016; Shijun et al., 2015).

En México, Plantaciones de Tehuantepec (PLANTEH), S.A. de C.V. inició el establecimiento de plantaciones de eucalipto en 1997 en dos municipios del Estado de Oaxaca y uno de Veracruz, en altitud promedio de 120 m para producir madera para pulpa y papel. La semilla se obtuvo de plantaciones establecidas en Brasil, cuyo origen

se desconoce y tampoco se tiene registro del número de árboles de los cuales se obtuvo el germoplasma. Para el año 2006 se inició un programa de Estrategias de Mejoramiento Genético Forestal en Oaxaca, con la selección de árboles “Plus” y el establecimiento de cuatro áreas semilleras, dos para *Eucalyptus grandis* y dos más para *E. urophylla*, identificadas como AS01 y AS02 en cada caso. Se hizo un raleo fenotípico en cada área semillera, por lo que la densidad varió alrededor de 100 árboles ha⁻¹ en el AS01 y aproximado de 150 árboles ha⁻¹ en el AS02 (Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados [CONAFOR-CP], 2011). El diámetro, altura, rectitud de fuste y ausencia de cancro del tallo a los 6 años de plantación determinaron la selección. Durante el año 2008 se lograron establecer dos ensayos de progenies, uno de *E. grandis* (EPG) y uno de *E. urophylla* (EPU). En el EPG se integraron 12 familias de 200 seleccionadas de cada área semillera; 12 familias de los árboles plus y 13 familias de un programa de mejoramiento genético en Argentina. El EPG se estableció para probar genotípicamente la productividad de las familias implicadas y convertirlo en un Huerto Semillero Sexual para establecer nuevas plantaciones comerciales con el material mejorado a producir, por lo que en la presente investigación se identificaron las familias de mayor crecimiento en altura total, en diámetro normal y a la base, y en volumen en el EPG, además, se determinaron las familias con superioridad en altura y forma del fuste.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estableció un ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis* (EPG) en el año 2008, en María Lombardo de Caso, San Juan Cotzocón, Oaxaca, en un terreno propiedad de la empresa PLANTEH, S.A. de C.V., ubicado entre las coordenadas geográficas extremas: 17° 25.992' L. N. y 95° 23.475' L. O., y 17° 26.042' L. N. y 95° 23.44' L. O., a 120 m.s.n.m. El clima de la zona corresponde al tipo Am (i): Cálido húmedo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015) con lluvias en verano, temperatura media anual de 25.8 °C y precipitación media anual de 1 668.5 mm (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2015).

El arbolado del EPG, producto de la polinización libre en plantaciones, proviene de cuatro fuentes: dos áreas semilleras (AS01 y AS02) establecidas en el año 2006 y 2007 árboles “plus” seleccionados con anterioridad en PLANTEH, correspondientes al proyecto “Estrategias de Mejoramiento Genético” en PLANTEH basado en plantaciones del 2000, y de un programa de mejoramiento genético en Argentina (ARG). Las áreas semilleras difieren en la densidad de árboles semilleros por la aplicación de un raleo fenotípico, por lo que se dejaron en pie alrededor de 100 y 150 árboles ha⁻¹ para AS01 y AS02, en ese orden. Los árboles que permanecieron en pie en las AS fueron los de mayor diámetro, altura, rectitud de fuste y ausencia de cancro crysoporthe en el tallo (observada ocularmente). Para la selección de árboles plus, se hicieron recorridos por todas las áreas plantadas con la especie, se identificaron los mejores fenotipos, considerando los mismos criterios que para las AS, y los árboles de fenotipo inferior que los rodeaban se derribaron para evitar la polinización con el árbol plus. Para cada fuente se

seleccionaron, por su mayor crecimiento promedio durante la producción en vivero, las 12 mejores familias = 36, excepto ARG que aportó 13 familias, para un total de 49 familias.

Las familias se identificaron con números arábigos consecutivos dentro y entre fuentes y se les asignó un color distintivo por Fuente (Cuadro 1.1). Los mejores 25 descendientes por familia se distribuyeron en un diseño al azar de 5 x 5 bloques con 7 x 7 árboles cada uno, a una distancia de 3 x 3 m. Dentro de los bloques se representaron las familias por un solo árbol. El EPG se delimitó con una franja de protección de dos hileras de árboles de ARG.

Cuadro 1.1. Nomenclatura de familias para cada fuente de germoplasma del estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fuente	Nomenclatura de familias
AS01	01-12 (negro)
AS02	13-24 (verde)
PLUS	25-36 (rojo)
ARG	37-49 (azul)

AS01: Área semillera 01; AS02: Área semillera 02; PLUS: Árbol plus; ARG: De Argentina

Los árboles se midieron cada año a partir del primero y hasta el sexto año de plantación, aunque también se tienen datos a los 5.5 y 6.5 años. Durante el lapso de medición se derribaron algunos árboles dominados y enfermos, por lo que el número de árboles al final varió entre familias de 16 a 25 árboles. El estado físico se evaluó y designó como individuo sano=0 o enfermo=1 si presentaba signos o síntomas del “cancro del eucalipto”

de acuerdo con Paredes-Díaz, Jasso-Mata, López-Upton y Alvarado-Rosales (2010). Se registró la altura total (A), diámetro a 1.30 m (DN), diámetro a la base (DB) de cada individuo. Se utilizaron un altímetro “Haga” y una cinta diamétrica “Forestry Suppliers 2830”, para obtener la altura total y diámetros, respectivamente. El volumen del fuste (V) se obtuvo mediante la fórmula desarrollada para la especie en la zona de estudio, la cual corresponde al ajuste del modelo Schumacher-Hall (Galán, De los Santos & Valdez, 2008; Jerez-Rico, Moret-Barillas, Carrero-Gámez, Macchiavelli & Quevedo-Rojas, 2011).

$$V_i = (0.000037) * (DN_i^{1.908525}) * (A_i^{1.056786})$$

Donde: V_i = Volumen individual (m^3); DN_i = Diámetro normal (cm); A_i = Altura total (m)

El volumen individual estimado resultó en valores decimales, por lo que se calculó en decímetros cúbicos (dm^3) para evitar el problema de manejo de números con dígitos con mayor cantidad de decimales. A cada árbol se le asignó un número único dentro del ensayo de progenies y se consideró como factor de variación aleatorio (consecutivo).

Existen documentos relacionados con el crecimiento a nivel de familias y clones en los que se han empleado procedimientos como el GLM (Mesén et al., 2007) o ANOVA (Shijun et al., 2015; Soares, Flôres, Dias, Arantes & Paschoarelli, 2011), sin embargo, en el caso de medidas repetidas es necesario utilizar modelos mixtos, pues al especificar los factores aleatorios éstos muestran valores pequeños en el criterio bayesiano de información (CBI) y el criterio de información de Akaike (CIA), que indican el grado de ajuste del modelo a los datos analizados; a menor valor de dichos criterios, la

probabilidad de que el modelo sea el adecuado es mayor, comparando entre varios modelos (Jerez-Rico, Moret-Barillas, Carrero-Gómez, Macchiavelli & Quevedo-Rojas, 2011). El grado de ajuste permite identificar con mayor precisión las diferencias estadísticas significativas entre factores de estudio (Jerez-Rico et al., 2011). En comparación a los modelos de efectos fijos, los modelos mixtos además de presentar considerablemente mejor ajuste, los residuales son menores (Carrero, Jeréz, Macchiavelli, Orlandoni & Stock, 2008). Además, resuelven el problema de correlación que existe entre las lecturas tomadas en distintas edades en un mismo individuo (Brien & Demétrio, 2009; Davis, 2002).

Por otro lado en los modelos de crecimiento, el tipo Schumacher-Hall presenta un mejor ajuste para el caso de esta especie (Barrios, López & Nieto, 2014; De Souza, Mehtätalo & Ferreira, 2015; Galán, De los Santos & Valdez, 2008) y cuando es lineal ofrece buenos resultados (Soares et al., 2011), a pesar del menor sesgo de los modelos no lineales (Delgado-Matas & Pukkala, 2015), además de que se puede trabajar con los datos transformándolos con la función log natural (Hjelm, Mola-Yudego, Dimitriou & Johansson, 2015; Jerez-Rico et al., 2011), a diferencia del modelo exponencial que necesita crear un mayor número de variables ficticias. El modelo Schumacher describe adecuadamente el patrón de crecimiento utilizando solo dos parámetros: La altura máxima o asíntota y la tasa de crecimiento (Jerez-Rico et al., 2011).

Por lo antes mencionado, los datos de cada variable respuesta se transformaron con la función log para hacer lineal el modelo original, exponencial, y se analizó con el paquete de computo SAS (SAS Institute, 2002), que automáticamente utiliza el método "REML". Las variables estuvieron en función de un modelo mixto, que considera el valor máximo

alcanzable en las características estudiadas, único para todas las familias (β_0) y la tasa de crecimiento con la edad (β_1 para la familia promedio y β_2 para el resto de familias), además del individuo como factor aleatorio (consecutivo):

$$\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 IE + \beta_2 (FAM)_i * (IE) + CONSECUTIVO + \varepsilon$$

Donde: $\ln Y_i$ = Vector de observaciones de la variable de interés transformada (A, DN, DB o V) de la i ésima familia; β_0, β_1 y β_2 = Parámetros a estimar; $(FAM)(IE)$ = Vector del factor de tasa de crecimiento de cada familia (factor fijo); CONSECUTIVO = Vector de factor individuo que corresponde al número único asignado a cada árbol del ensayo de progenies, devela el efecto de cada familia y modela la heterogeneidad entre unidades experimentales (factor aleatorio) y ε = Error experimental.

A diferencia del modelo Schumacher-Hall generalizado, se adicionó el vector de interacción de la familia con la edad $[(FAM)(IE)]$ para obtener tasa de crecimiento promedio de cada familia. El programa en automático comparó todas las familias con la última en el orden, en este caso 49, la cual coincidió con la del comportamiento medio en las variables de interés.

La solución arrojada por el programa SAS, para cada variable, se llevó a una hoja de cálculo y se acomodaron en orden descendente los estimadores del factor $(FAM)(IE)$ de cada familia, para identificar aquellas con la tasa crecimiento superior e inferior, en comparación a la promedio (49).

Los valores del modelo se re transformaron con la función inversa (exponencial), y se proyectó el crecimiento dinámico de las variables medidas en función de la edad para un periodo de 8 años. Las curvas de crecimiento permitieron ilustrar las familias con un desempeño extremo superior (FS) e inferior (FI), respecto al promedio (FP), en las variables estudiadas A, DN, DB y V, identificando el número de familia entre paréntesis. Las familias que no presentaron diferencia significativa en las variables estudiadas fueron similares a FP (49).

$$\tilde{Y}_i = \text{EXP } \beta_0 \{ \text{EXP } [(\beta_1 + \beta_2)/E]\}$$

Donde: \tilde{Y}_i = Promedio de la familia “i” en la variable de interés (A, DN, DB, VOL) a la edad de proyección (1 al 8); EXP = Base de los logaritmos naturales; β_0 = Intercepto, asíntota para cada variable de interés; β_1 = Estimador de la tasa de crecimiento de la familia promedio (49) en función de la edad; β_2 = Estimador de la tasa de crecimiento de las familias y E = Año de proyección (1-8 años), en este caso se obtiene el recíproco.

Con el propósito de clasificar las familias por su desempeño en A y forma de fuste (F) se calculó un índice combinado (AF) en el cual se estandarizaron los valores de ambas variables de manera similar a Mesén et al. (2007). Debido a que no se tomaron datos de F, ésta se obtuvo de manera indirecta a través de la diferencia entre DB y DN (DD) para los árboles sanos de la última lectura; donde los valores más cercanos a cero indican árboles con fustes más cilíndricos, que es la forma deseada. El valor mínimo y máximo de DD obtenido se utilizó para definir rangos de clase de ancho constante, entonces a

cada árbol se le asignó una categoría, de acuerdo a su valor de DD como se indica a continuación (Cuadro 1.2).

Se obtuvo el promedio de los rangos de clase para obtener el promedio de familias aplicando la prueba de Kruskal-Wallis (Davis, 2002) y obtener la desviación estándar del índice AF.

Cuadro 1.2. Clasificación de la forma del fuste con base en su diferencia en diámetro de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Categoría	Rango de clase de DD
6	0.250-1.555
5	1.556-2.906
4	2.907-4.257
3	4.258-5.608
2	5.609-6.959
1	6.960-8.310

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentaron por separado para cada variable de crecimiento. La tasa de crecimiento se estimó a nivel de familia y se graficó como la desviación respecto a la de crecimiento promedio, la número 49 (FP). El orden de aparición en el gráfico obedeció a la magnitud de la diferencia, por lo que no siguió un orden consecutivo. El turno de cada familia se determinó por el valor de su respectiva diferencia adicionado a la tasa de crecimiento de la familia promedio. Aunque no se indicó la tasa de crecimiento de FP, ésta se comentó en el texto, adquirió un valor negativo debido a que la edad se expresa en la fórmula con su recíproco ($1/\text{edad}$). Un valor más negativo, indicó un turno más largo. Las familias con significancia estadística se distinguieron con el ashurado de su respectiva barra ($p \leq 0.05$). Finalmente se graficaron las curvas que describen el crecimiento de las familias superior (FS), promedio (FP) e inferior (FI), con el valor transformado de la tasa de crecimiento.

Crecimiento en altura total

De acuerdo con la tasa de crecimiento en altura (A), hubo 12 familias superiores al promedio (FS), con una significancia del 5.0 %, de las cuales el 50.0% corresponden a AS02 (verde), 25 % de AS01 (negro), 16.7 % de plus (rojo) y ARG (azul) solo tuvo una FS y el resto fue similar al promedio, de acuerdo con la Figura 1.1.

El valor estimado de la tasa de crecimiento en A para la FP (49) fue de -1.4 años, mientras que para la FS (33) y para la familia inferior (FI, 30), con tasa de crecimiento de extremos

contrarios, se tiene un turno de -1.2 y -1.5 años, respectivamente; esto significa que la FS (33) tiene un turno 2.4 meses menor que la FP y 4.8 meses menos respecto a la inferior. La implicación práctica es la oportunidad de tener el producto en menor tiempo y la reducción de costos por mantenimiento, es decir, una menor edad de rotación de FS.

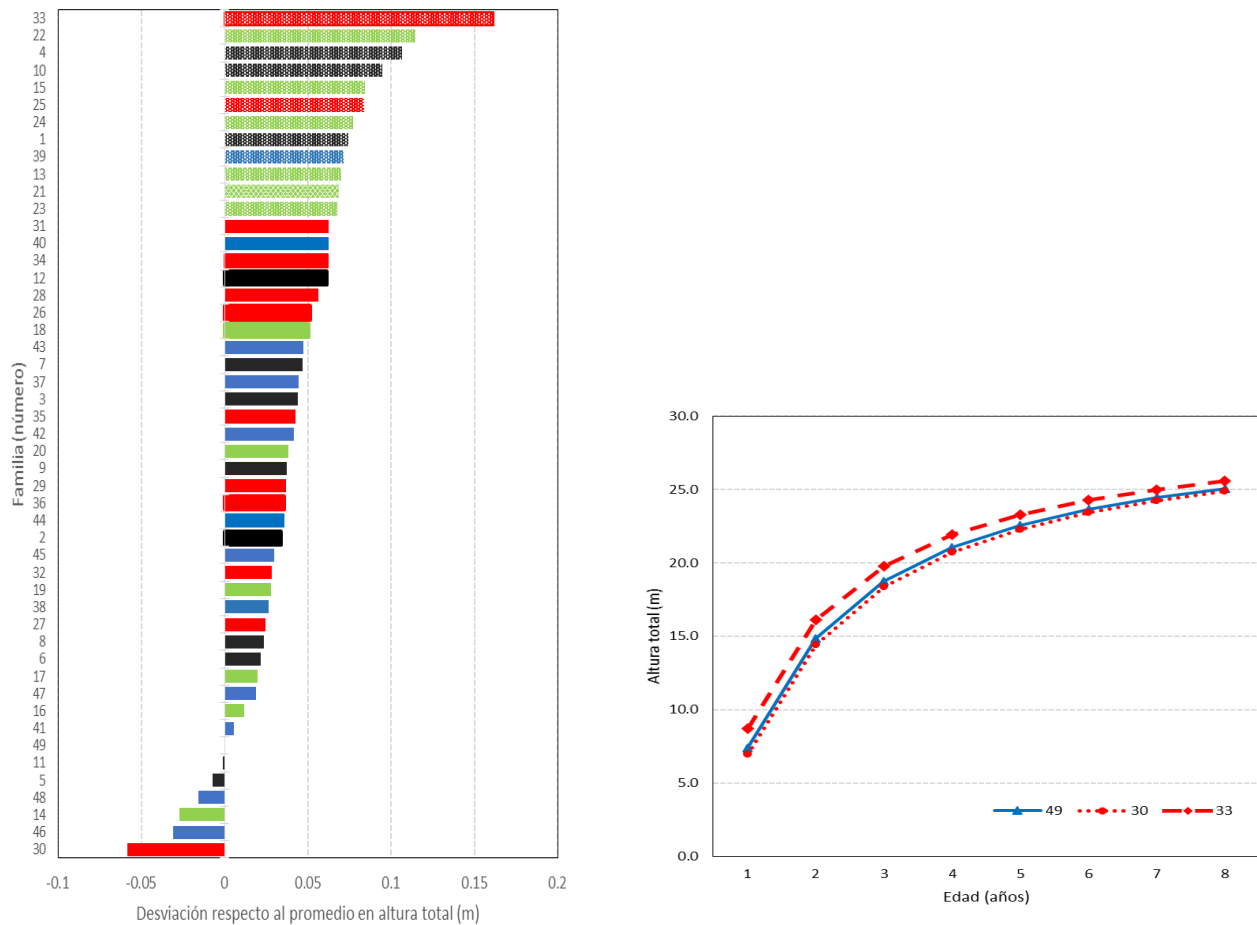


Figura 1.1. Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en altura total (m), respecto a FP (49) y Der. Proyección del crecimiento promedio en altura de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Los datos de campo indicaron que la altura promedio a los 6 años fue de 25.3 m (IMA de 4.2 m). Sin embargo, de acuerdo con el modelo, el máximo potencial es de 29.8 m,

alcanzable hasta después del tiempo de proyección. El gráfico indicó que la altura promedio a los 3 años para la peor (FI) y para la mejor familia (FS) fueron de 18.4 y 19.8 m, lo que representa un IMA de 6.1 y 6.6 m respectivamente. Martini et al. (2016) obtuvieron para el híbrido *Eucalyptus urograndis* en Brasil, una altura de 16.0 m a los 5 años de plantación, esto implica un IMA de 3.2 m; Oliveira et al. (2016), reportaron para este híbrido en Brasil, una altura de 11.1 a 17.1 m a los 2.5 años (IMA de 4.4 y 6.8 m). Por su parte Shijun et al. (2015) reportan para clones seleccionados del híbrido *E. urograndis* en China una A de 12.2 a 16.3 m a los 3.7 años, que corresponde a un IMA de 3.3 a 4.4 m y Mesén et al. (2007) observaron en Costa Rica una altura entre 19.9 y 23.5 m para la F₂ de *E. grandis* a los 4.4 años, es decir, un IMA de 4.5 y 5.3 m, respectivamente.

Por otra parte, para *E. nitens*, otra de las especies deseables para producción de pulpa para papel, la altura fue de 6.43 m (Little & Gardner, 2003); Swain, Verryn y Laing (2013) reportaron un valor de 20.6 m para esta variable en un huerto semillero a los 7.3 años (IMA de 2.8 m). Para esa misma especie en Sudáfrica y González-García, Hevia, Majada y Barrio-Anta (2013) obtuvieron en el noroeste de España en árboles de entre 2 y 5 años una altura máxima de 10.4 m.

Gómez-García et al. (2015) registraron para *E. globulus* 15.3 m en altura promedio en árboles de entre 2 y 17 años en España.

En Australia Bush, Marcar, Arnold y Crawford (2013) encontraron que la A en *E. camaldulensis* varió entre 2.9 y 5.6 m en árboles de 2.8 años (IMA de 1.0 y 2.0 m, respectivamente), solo que en este caso se estudiaron bajo condiciones de salinidad, lo que generó un detrimento en la altura. Otro trabajo realizado en Australia indica que *E.*

grandis alcanzó entre 6 y 9 m de altura a los 3.2 años, lo que corresponde a un IMA de 1.9 y 2.8 m, respectivamente (Forrester & Smith, 2012).

La tendencia del crecimiento en altura muestra que es acelerado el primer año de plantación y después presenta una reducción gradual, hasta casi estabilizarse. La FS (33) en el año 1 tiene una altura de 8.7 m, es decir, 1.7 m más que la FI (30), sin embargo, para el año 8 esta diferencia se reduce, cuando la altura del arbolado se acerca a 25.6 m, que representa la altura máxima para el periodo de proyección, sin embargo, se espera un máximo de 29.8 m para la población. El incremento máximo de FP (49) en A se presenta a los 1.4 años, tiempo que el incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) son máximos, con un valor de 11.0 m (Figura 1.1).

Los datos de campo reflejan un valor de crecimiento muy cercano a lo encontrado por el modelo, sin embargo, los resultados comparados con otros autores, indican superioridad.

Crecimiento en diámetro normal

Del total de familias estudiadas, solo 14 presentaron un crecimiento en diámetro normal (DN) superior al promedio, de las cuales el 50.0 % pertenece a la fuente plus, 35.7 % de ARG y solo una de AS01 y una más de AS02. A diferencia de la variable anterior, ésta presentó familias con crecimiento inferior (7), de la fuente AS02, es decir, el 50.0 % de sus familias probadas (Figura 1.2).

La tasa de crecimiento en DN obtenido para FS (28), FP (49) y FI (14) determinan un turno de -1.0, -1.2 y -1.4 años, respectivamente, con lo que se observó que FS (28) alcanzó su máximo DN a los 3.6 meses antes que FP (49) y 4.8 meses respecto a FI (14).

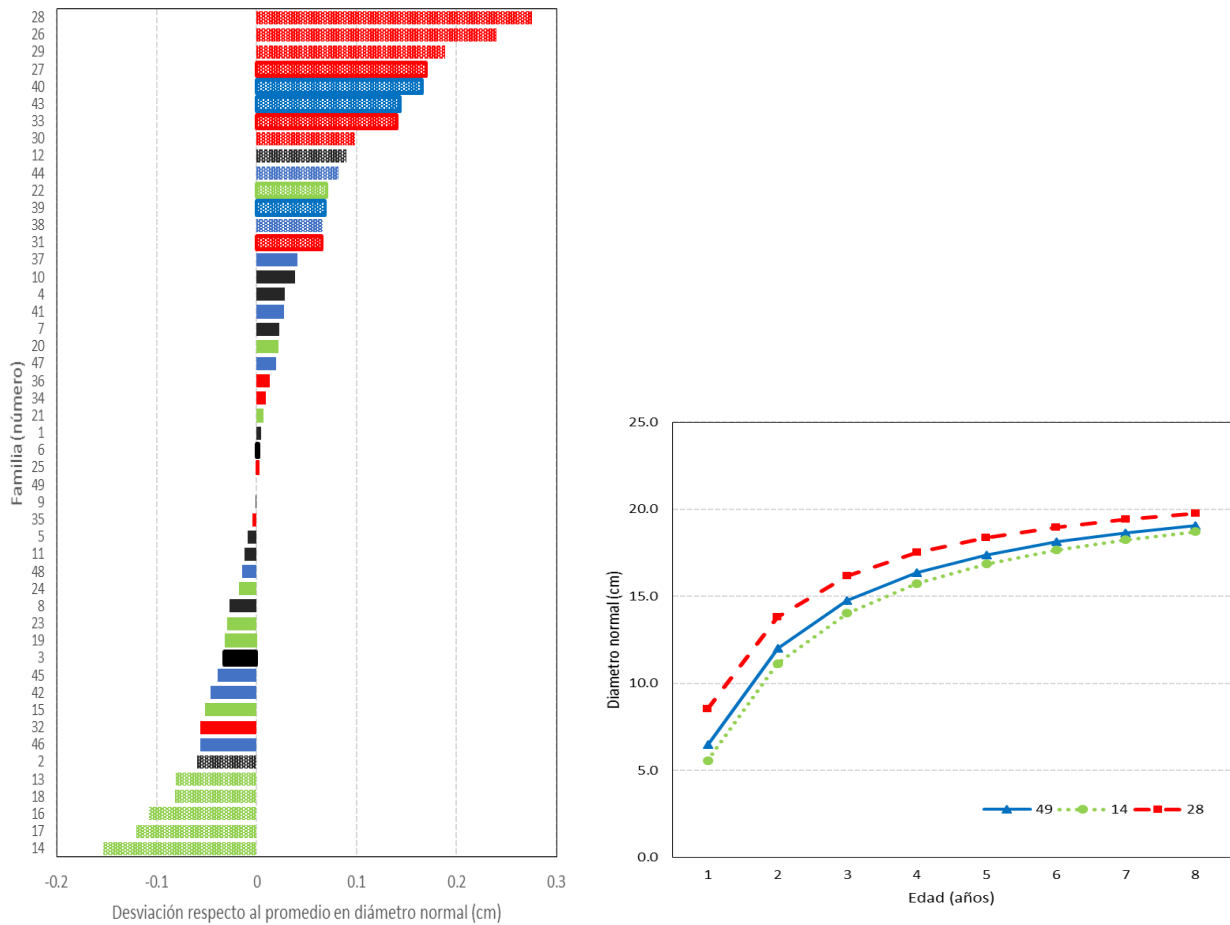


Figura 1.2.Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en diámetro normal (cm), respecto a FP (49) y Der. Proyección del crecimiento promedio en diámetro normal de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Los datos de campo reflejaron un promedio a los 6 años de 19.7 cm (IMA de 3.3 cm). Sin embargo, de acuerdo con el modelo, el máximo potencial es de 22.2 cm, alcanzable hasta después del tiempo de proyección. El DN promedio a los 3 años varió de 14.0 a

16.2 cm (IMA de 4.7 y 5.4 cm). Martini et al. (2016) obtuvieron un valor de 14 cm a los 5 años de plantación del híbrido *E. urograndis* (IMA de 2.8 cm); Shijun et al. (2015) encontraron en clones seleccionados del híbrido *E. urograndis* en China a los 3.7 años valores entre 9.9 y 12.3 cm (IMA de 2.7 y 3.2 cm) en esta variable, mientras que Oliveira et al. (2016) señalan un valor de 9.14 a 12.64 cm a los 2.5 años (IMA de 3.7 y 5.1 cm). Por su parte Mesén et al. (2007) para la F₂ de *E. grandis* a los 4.4 años reportaron un DN de 17.1 cm para la peor familia y 27.0 cm para la mejor (IMA de 3.9 y 6.1 cm).

Para *E. nitens* en España, González-García et al. (2013) reportaron un máximo de 13.3 cm de DN en árboles entre 2 y 5 años; para un huerto semillero de esta misma especie Swain et al. (2013) registraron diámetros de 15.77 cm a los 7.3 años (IMA de 2.2) en plantaciones de Sudáfrica; mientras que Gómez-García et al. (2015) registraron para *E. globulus* 13.4 cm de diámetro promedio en árboles de entre 2 y 17 años.

En Australia Bush et al. (2013) encontraron para *E. camaldulensis* entre 3.3 y 10.4 cm de DN en árboles de 2.8 años (IMA de 1.2 y 3.7 cm) y, Forrester y Smith (2012) obtuvieron, para *E. grandis*, 5 cm a los 3.2 años (IMA de 1.6 cm).

Estos resultados indican una similitud a lo obtenido para el híbrido *E. urograndis* y para otras poblaciones de *E. grandis* fuera de su área de distribución natural. Además, supera a lo reportado para *E. nitens* y *E. camaldulensis*, otras especies de importancia en la elaboración de papel y muebles, respectivamente.

El crecimiento en DN, de acuerdo con la curva obtenida, también es rápido en los primeros años y después se reduce gradualmente. El valor asintótico del diámetro normal para el tiempo de proyección se observa alrededor de los 19.5 cm, pero el máximo alcanzable poblacional es de 22.2 cm (Figura 2). El máximo incremento se obtiene a los

1.2 años cuando FP (49) mide 8.0 cm de diámetro en este tiempo el IMA también es máximo, con un valor de 6.7 cm. FS (28) crece 3.0 cm más que FI (14) en el primer año, teniendo ésta un DN promedio de 8.5 cm y luego decreció en extremo a los 8 años, alrededor de los 19.7 cm.

El comportamiento observado para el crecimiento en diámetro concuerda con lo observado por Delgado-Matas y Pukkala (2011); Forrester y Smith (2012); Martini et al. (2016) y Mesén et al. (2007).

Como en la variable anterior, por un lado, también se observa una similitud entre lo que indican los datos de campo y los reportes de otros autores en algunas edades, y por otro lado, existe una discrepancia con respecto a lo que arroja el modelo y los reportes.

Crecimiento en diámetro basal

Respecto a esta característica, el ensayo presentó 26.5 %, del total de grupos familiares, con crecimiento inferior al promedio. De estas 13 familias, el 38.4 % pertenece al AS01, seguido por el 23.1 % de ARG y el mismo valor de AS02, y el 15.4 % del grupo PLUS (Figura 1.3).

El turno de crecimiento obtenido en diámetro a la base (DB) para FS (40), FP (49) y FI (17) de -0.9, -1.1 y -1.4 años, respectivamente, indica que FS (40) alcanza su máximo DB en 2.4 meses menos que FP (49) y 6 meses en comparación con la FI (17).

Como se observa, las familias se distribuyen en su mayoría por debajo del crecimiento de la familia promedio, es decir, presenta valores negativos. Esta situación puede dar lugar a que presenten un índice de altura-forma positivo.

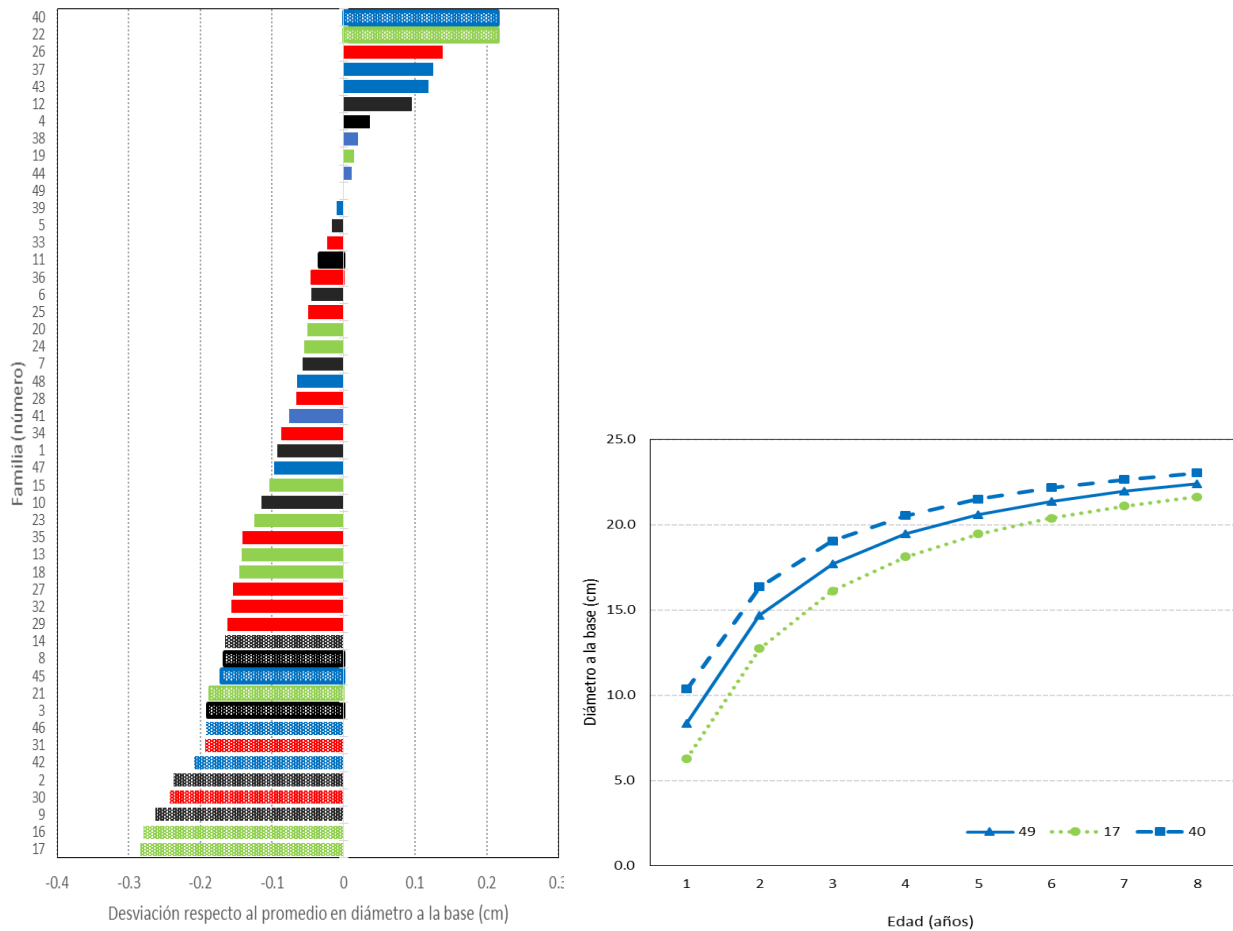


Figura 1.3. Izq. Distribución de las desviaciones del promedio en diámetro a la base (cm) y Der. Proyección del crecimiento promedio en diámetro a la base de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

El promedio derivado de los registros de campo arrojaron que a los 6 años el DB fue de 22.1 cm (IMA de 3.7 cm). Como en el caso de las variables anteriores, el patrón de crecimiento en diámetro basal, obtenido por el modelo, indicó una pendiente notable en los primeros años de plantación. El máximo DB fue alrededor de los 22.5 cm para el

periodo, sin embargo, se espera que alcance un máximo poblacional de 25.8 cm. El tiempo de proyección permitió observar que este máximo está próximo a alcanzarse. Para el primer año FS (40) logró alcanzar 10.4 cm, a diferencia de la familia en el extremo opuesto que apenas presenta 6.3 cm a esa edad, por lo que esta familia necesitaría cerca de 1.6 años para alcanzar dicha dimensión. La diferencia en crecimiento potencial entre ambas familias se va reduciendo hasta 1.4 cm a los 8 años, cuando FI (17) proyecta un crecimiento promedio de 21.6 cm. (Figura 1.3).

La tendencia del crecimiento en esta variable fue similar al comportamiento de las anteriores, es decir, un crecimiento acelerado en edades tempranas y después de alcanzar un valor máximo se redujo gradualmente.

Crecimiento en volumen

El análisis indica que hubo 15 familias superiores en el crecimiento en volumen (V), cerca del 40.0 % pertenecen a la fuente plus y 33.3 % a ARG, 20.0 % a AS01 y solo el 6.7 % a AS02 (Figura 1.4).

Para la familia superior, media e inferior (28, 49 y 14) se obtuvo un turno de -3.2, -3.8 y -4.2 años, respectivamente. Lo anterior permite inferir que FS (28) tiene potencial para alcanzar su máximo crecimiento anticipado por 7 meses, respecto a la FP (49), y 1 año antes en comparación con la FI (14).

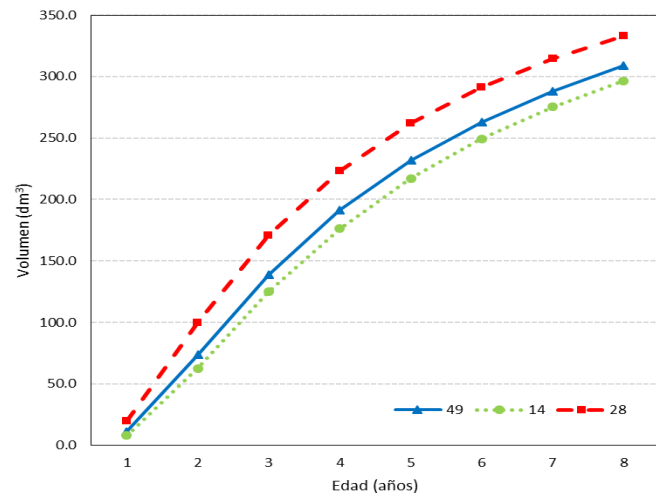
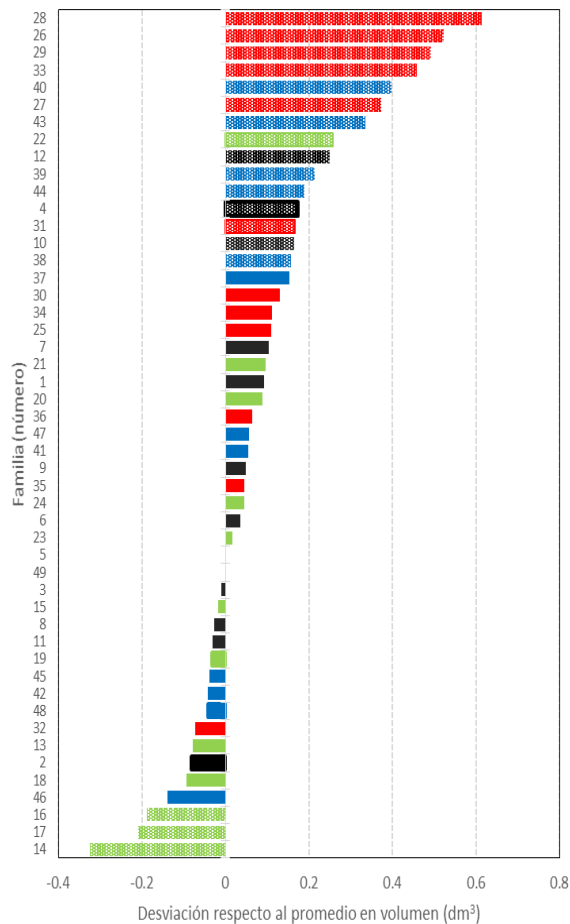


Figura 1.4. Izq. Distribución de las desviaciones de la tasa de crecimiento en volumen (dm^3) respecto a FP y Der. Proyección del crecimiento promedio en volumen de la familia superior, promedio e inferior en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Los registros de campo arrojaron un promedio a los 6 años en V de 354.8 dm^3 (IMA de 59.1 dm^3). El volumen esperado para la familia inferior y superior a los 7 años es de 275.1 y 314.6 dm^3 , en ese orden (IMA de 39.3 y 44.9 dm^3 , respectivamente) y a los 2 años el volumen fue de 62.5 y 99.8 dm^3 , IMA de 31.25 y 49.9 dm^3 , respectivamente.

Existen pocos trabajos en la literatura que aborden el crecimiento en volumen de algunas especies de *Eucalyptus*. Swain et al. (2013) obtuvieron para *E. nitens* a los 7.3 años un volumen de 125.0 dm^3 en material no mejorado y de 178.0 dm^3 en poblaciones

mejoradas, lo que implica un IMA de 17.1 y 24.4 dm³. Mientras que Bolzan, Boechat y Fernandes (2014) obtuvieron para el híbrido *E. urograndis* un valor de 31.0 dm³ a los 2 años (IMA de 15.5 dm³). En este trabajo se obtuvieron mayores incrementos en volumen que lo obtenido para *E. nitens* en más del 50.0 %, sin embargo, comparado con el híbrido de *E. urograndis*, los valores de IMA son muy similares, esto puede deberse a que para la primera especie las poblaciones son sin mejorar y un rango variado de edades (2 - 7 años).

El incremento máximo se observa a los 3.8 años, cuando V es de 181.9 dm³ para FP (49), por lo que el ICA e IMA máximos corresponden a 47.5 dm³. Al primer año para FS (28) es de 20.0 dm³, lo que representa un crecimiento de 12.2 dm³ más que FI (14), alcanzando una diferencia de 36.8 dm³ al octavo año, cuando FS (28) tiene potencial de 333.2 dm³. A los 8 años no se observa un valor en el cual el crecimiento en volumen se estabilice o cese, sin embargo, potencialmente la población puede alcanzar un máximo de 497.9 dm³ (Figura 1.4).

De manera similar a las variables anteriores, el V presenta durante los primeros años un crecimiento acelerado, sin embargo, como es de esperarse, alcanza su máximo crecimiento después que las variables anteriores debido a que el diámetro normal impacta en V casi al cuadrado (1.908525), de acuerdo con la fórmula utilizada para su cálculo. Esta tendencia de crecimiento fue obtenida por Delgado-Matas y Pukkala (2011) al estudiar *E. grandis* en Angola, aunque estos autores estudiaron hasta los 43 años de plantación, aún no lograba estabilizarse el crecimiento en volumen y a los 23 años se redujo el incremento medio anual, debido a que el diámetro medio pareció estabilizarse

cerca de los 10 años, sin embargo, continuó aumentando sin observar estabilidad durante el tiempo de evaluación.

El promedio de los datos de campo y el crecimiento obtenido en volumen son distintos entre sí y difieren aún más de los reportes de la literatura, mostrando una superioridad de más del 30.0 %.

Comportamiento general de las familias

Las Familias 1, 13, 15, 21, 23, 24 y 25 destacan solo en A; las 4 y 10 en A y V; las 12, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 38, 43, 44, en DN y V; la 30 solo en DN; las 33 y 39 en A, DN y V; la 40 en DN, DB y V, y la familia 22 es superior a FP (49) en todas las variables dasométricas de interés. Dentro de cada fuente, se tienen 5, 6, 8 y 5 familias que son superiores dentro de los grupos mencionados, para AS01, AS02, PLUS y ARG, respectivamente.

Esto difiere de lo esperado, porque al haber aplicado mayor intensidad de selección en el establecimiento del AS01, la progenie debió tener mejor calidad genética en las variables estudiadas que el AS02, de acuerdo con White et al. (2007).

Lo anterior con seguridad se presentó debido a que la predominancia de AS01 es del orden fenotípico, sin embargo, al ponerlos en un ambiente común en el ensayo, se reveló que las familias del AS02 son genéticamente superiores (White et al., 2007). Sin embargo, esto pudo suceder porque en el AS01 las condiciones ambientales, favorecieron a los árboles seleccionados que mostraron buen fenotipo, al darse la apertura de dosel; y que al ponerlos en un ambiente común en el EPG, se reveló que las

familias del AS02 son genéticamente superiores en ese nuevo ambiente. Se obtuvo más familias de árboles PLUS que para el resto de las fuentes, esto va acorde con las expectativas, ya que al seleccionar los árboles plus se eligió lo mejor de distintas zonas de plantación y se eliminaron los fenotipos menos deseables que los rodeaban, por tanto, se aplicó mayor intensidad de selección en comparación a las áreas semilleras.

Por otra parte, la fuente ARG, aunque ya tiene un cierto grado de mejoramiento, la superioridad de la elección solo aplica bajo los ambientes de prueba (White et al., 2007).

Tendencia del crecimiento en las variables dasométricas

El crecimiento en A y DN cesa más temprano que el crecimiento en volumen y se observa que el nivel de crecimiento en V se mantiene por más tiempo, esta situación concuerda con el comportamiento de las especies de rápido crecimiento temprano, es decir, presenta un ritmo acelerado los primeros años de vida y luego se reduce gradualmente (De los Santos-Posadas, Montero-Mata & Kanninen, 2006; Gómez-Tejero, De los Santos-Posadas; Fierros-González & Valdez-Lazalde, 2009; Martini et al., 2016).

Los datos de campo indican que, en promedio, las dimensiones (A, DN y V) son cercanas a lo encontrado para *E. grandis* y otras especies del género; sin embargo, los valores reflejados por el modelo fueron superiores; excepto en el caso del híbrido *E. urograndis* cuyos valores son muy similares.

La discrepancia entre lo observado en este estudio y los reportes de otros documentos se pueden atribuir a la diferencia en condiciones ambientales, como lo observó Kojima et al. (2009) en *E. grandis* a diferentes latitudes en Brasil. La distribución de lluvias

afectan la disponibilidad de agua en el suelo y el déficit de presión de vapor pueden limitar el crecimiento al afectar la apertura de los estomas, por tanto la producción de fotosintatos, lo cual afecta el IMA entre regiones y dentro de un mismo sitio a lo largo del año (Almeida, Soares, Landsbeg & Rezende, 2006); además de la calidad genética del arbolado.

Las variaciones entre el modelo y los datos de campo (no presentados) indican que la curva debe presentar una pendiente mayor o un crecimiento aún más acelerado, por tanto, la población alcanzaría más rápido su máximo crecimiento. Esto pueden deberse a la naturaleza del modelo, puesto que la proyección requirió la re transformación de lineal (ln) a exponencial (exp), lo que implica una variación en los valores; aunque, en mayor medida influyó el parámetro asíntota, pues se consideró fija para todas las familias y ésta, es variable para cada familia e incluso a nivel individual (no presentado). Sin embargo, para los objetivos de esta investigación, el modelo permitió identificar de una manera más clara las familias a elegir para depurar el ensayo de progenies.

Índice altura total y forma del fuste

El valor promedio del índice combinado altura total-forma (AF) en el ensayo fue de -0.04 y de las familias con valor positivo fue de 0.43. El 42.9 % de las familias presentaron valores positivos (Cuadro 1.3). Solo las familias 1, 13, 10, 15, 23, 25, 27 presentaron, además de un índice positivo, una altura estadísticamente superior al promedio. Mientras que las familias 2, 3, 6, 8, 9, 14, 16, 17, 18, 20, 32, 34, 35, 42 y 45 deben un valor positivo al factor forma, ya que son estadísticamente similares al promedio en altura.

El hecho de que cerca del 43.0 % de las familias presenten valores positivos de AF, refleja la superioridad del ensayo en estas dos variables y se identificaron con mayor claridad las familias inferiores (Mesén et al., 2007).

Como se esperaba, aquellas familias con crecimiento superior al promedio en DB también presentaron un índice combinado AF negativo.

Cuadro 1.3. Familias con índice combinado altura-forma del fuste positivo de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fuente	Familia	Índice AF	
AS01	8	1.01	
	3	0.86	
	2	0.72	
	6	0.48	
	1	0.43	
	9	0.31	
	10	0.12	
	5	0.00	
	AS02	17	1.39
		14	1.28
16		0.66	
18		0.27	
15		0.26	
23		0.23	
20		0.12	
13		0.06	
PLUS	21	0.00	
	32	0.57	
	25	0.49	
	34	0.40	
	35	0.27	
ARG	27	0.08	
	42	0.33	
	45	0.10	

Selección de las mejores familias

Por un lado, las características de crecimiento tuvieron una proporción de familias muy variable y aunque la número 22 superó al promedio en todos los caracteres, el índice altura-forma del fuste fue negativo, es decir, no hubo una tendencia de familias o fuentes a la superioridad.

Por otro lado, en A, el número de familias superiores fue mayor que respecto a DN, DB, V o índice AF. Sin embargo, como es de interés considerar en la selección varias características simultáneamente, se obtuvo que DN-V, DN-AF y V-AF concentraron altas frecuencias de familias. La variación en la base genética (número de familias e individuos por familia) es de vital importancia para el programa, ya que con la depuración del ensayo de progenies se promoverá la polinización libre entre los individuos de las mejores familias no emparentadas (White et al., 2007).

1.6. CONCLUSIONES

A pesar de que el modelo sobreestimó la tasa de crecimiento anual, permitió identificar con claridad las familias superiores en cada variable.

La ausencia de una tendencia en la superioridad de fuentes y familias determinó la formación de grupos de características para identificar las mejores familias en el ensayo de progenies.

Los grupos de características que ofrecieron mayor número de familias fueron DN-V, DN-AF y V-AF y por lo tanto, estos indican los criterios de selección para depurar el ensayo de progenies y convertirlo en huerto semillero sexual

Las mejores familias por grupo fueron: 12, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 38, 39, 40 y 43 (12) en DN y V; la familia 27 (1) en DN y AF, y las familias 10, 27 y 42 (3) en V y AF; y del total de 16 familias, solo la 27 está incluida en los tres grupos, por lo tanto, los árboles con mejor fenotipo de estas familias, deben formar parte del huerto semillero.

La familia 22, que tiene un índice altura-forma negativo, sin embargo, tiene buena altura y diámetro, además, la familia 20, que es igual al promedio en todas las características, pero, el índice altura-forma es positivo, deben ser analizadas en campo antes de proceder con el derribo.

1.7. LITERATURA CITADA

- Almeida, A. C., Soares, J. V., Landsberg, J. J. & Rezende, G. D. (2006). Water use and yields of *Eucalyptus grandis* hybrids plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *INPE ePrint*: sid.inpe.br/ePrint@80/2006/07.25.29.19v12006-07-26, 1–42. Obtenido de <https://www.researchgate.net/>
- Barrios, T. A., López, A. A. M. & Nieto, R. V. M. (2014). Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia Forestal*, 17(2), 137–149. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a01>
- Bolzan, M., F., Boechat S., C. P. & Fernandes, da S. G. (2014). Individual tree growth models for *Eucalyptus* in northern Brazil. *Scientia Agricola*, 71(3), 212–215. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162014000300006>
- Brien, C.J. & Demétrio, G. B. (2009). Formulating mixed models for experiments, including longitudinal experiments. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 14(3), 253–280. doi: 10.1198/jabes.2009.08001
- Bush, D., Marcar, N., Arnold, R. & Crawford, D. (2013). Assessing genetic variation within *Eucalyptus camaldulensis* for survival and growth on two spatially variable saline sites in southern Australia. *Forest Ecology and Management*, 306, 68–78. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.008>
- Carrero, O., Jeréz, M., Macchiavelli, R., Orlandoni, G. & Stock, J. (2008). Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus*

- urophylla* en Venezuela. *Interciencia*, 33(4), 265–272. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2927911>
- Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados. (2011). *Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México*. Zapopan, Jalisco, México: Autor.
- Davis. C. S. (2002). *Statistical methods for the analysis of repeated measurements*. New York, EUA.: Springer.
- De los Santos-Posadas, H. M., Montero-Mata, M., & Kanninen, M. (2006). Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia*, 40, 521–532. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>
- De Souza, V. E., Mehtätalo, L. & Ferreira, B. J. L. (2015). Linear mixed-effects model and calibration applied to volume models in two rotations *Eucalyptus grandis* plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(1), 132–141. doi: 10.1139/cjfr-2014-0435
- Delgado-Matas, C. & Pukkala, T. (2011). Comparison of the growth models for six *Eucalyptus* species in Angola. *International Journal of Forestry Research*, 77(2), 141–152. doi:10.1155/2011/980259
- Du Plessis, M. & Kotze, H. (2011). Growth and yield models for *Eucalyptus grandis* grown in Swaziland. *Southern Forest*, 73(2), 81–89. doi: 10.2989/20702620.2011.610873
- Forrester, D., Medhurst, J.W.M., Beadle, Ch. & Valencia, J. (2010). Growth and physiological response to silviculture for producing solid-wood products form

- Eucalyptus* plantations: An Australian perspective. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1819–1835. doi:10.1016/j.foreco.2009.08.029
- Forrester, D. I., & Smith R. G. B. (2012). Faster growth of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus pilularis* in mixed-species stands than monocultures. *Forest Ecology and Management*, 286, 81–86. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.037>
- Galán, L. R., De los Santos, P. H. M. & Valdez, H. J. I. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalpa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y bosques*, 12(2), 65–82. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712008000200006&script=sci_arttext
- Gómez-García, E., Biging, G., García-Villabrille, J. D., Crecente-Campo, F., Castedo-Dorado, F. & Rojo-Alboreca, A. (2015). Cumulative continuous predictions for bole and aboveground woody biomass in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. *Biomass and Bioenergy*, 77, 155–164. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.026>
- Gómez-Tejero, J., De los Santos-Posadas, H. M, Fierros-González, A. M. & Valdez-Lazalde, J. R. (2009). Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(2), 161–169. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61011222011>
- Gonçalves, J.L.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F.D.B., Lima, W.D.P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.-P.D., Laclau,

- J.-P., Nouvellon, Y., & Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6–27. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811271200761X>
- González-García, M., Hevia, A., Majada, J. & Barrio-Anta, M. (2013). Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Dean y Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy*, 54, 147–157. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.019>
- Granados-Sánchez, D. & López-Ríos, G. F. (2007). Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2): 143–156. Obtenido de <http://www.chapingo.mx/revistas/forestales/>
- Hjelm, B., Mola-Yudego, B., Dimitriou, I. & Johansson, T. (2015). Diameter-height model for fast-growing poplar plantations on agricultural land in Sweden. *Bioenergy Research*, 8(4), 1759–1768. doi: 10.1007/s12155-015-9628-8
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Mapa digital de México V6.1. Climas (1921-1975). 20-12-2016 en <http://gaia.inegi.org.mx/>
- Jerez-Rico, M., Moret-Barillas, A. Y., Carrero-Gámez, O. E., Macchiavelli, R. E. & Quevedo-Rojas, A. M. (2011). Curvas de índice de sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en los llanos de Venezuela. *Agrociencia*, 45, 135–145. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>

- Kojima, M., Yamaji, F. M., Yamamoto, H., Yoshida, M. & Nakai, T. (2009). Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Eucalyptus grandis* from different latitudes in Brazil and Argentina. *Forest Ecology and Management*, 257, 2175–2181. doi:10.1016/j.foreco.2009.02.026
- Kramer, P. J. & Koslowski, T. T. (1960). *Physiology of trees*. New York, EUA: Mc-Graw Hill.
- Little, M.K. & Gardner, A.W., (2003). Coppicing ability of 20 *Eucalyptus* species grown at two high-altitude sites in South Africa. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(2), 181–189. Obtenido de <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/x02-170#.VwL-6rvmocA>
- Martini, S. F., de Carvalho, B. F., dos Santos, A. D. H. Ribeiro, D. A. & Montandon, C. G. (2016). Dynamics of aboveground biomass accumulation in monospecific and mixed species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on Brazilian sandy soil. *Forest Ecology and Management*, 363, 86–97. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.028>
- Mesén, F., Vásquez, W. & Víquez, E. (2007). Ensayos de familias F₂ de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* con fines de conversión en huertos semilleros. *Agronomía Costarricense*, 31(2), 9–20. Obtenido de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6794>.
- Meskimen, G. & Francis, J. (2000). *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. In J. K., Francis & C. A., Lowe (Eds.), *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*. (pp. 211–217). Puerto Rico: United States Department of Agriculture.

- Nichols, J. D., Smith, R. G. B., Grant, J. & Glencross, K. (2010). Subtropical eucalypt plantations in eastern Australia. *Australian Forestry*, 73, 53–62. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2010.10676310>
- Oliveira, C., R. V., Alves A., R. A., Garcia L., H., Mendes C., A. F. N., Silva, A., Pereira, R. S. & Assis L. F. (2016). Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. *Árvore*, 4(1), 107–116. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000100012>.
- Paredes-Díaz, E., Jasso-Mata, J., López-Upton, J. & Alvarado-Rosales, D. (2010). Presencia de *Chrysoporthe cubensis* (Bruner) Gryzenhout & M. J. Wingf. en plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 81–92. Obtenido de <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/153/144>.
- SAS Institute. (2002). The SAS system for Windows. Release. SAS Institute, Cary, N.C.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2015). Normales climatológicas. Normales 1951-2010. 20-12-2016 en <http://smn.cna.gob.mx/>
- Shijun, W., Zhaohua, L. Jianmin, X., Guangchao, C., Yingan, Z. & Guangyou, L. (2015). Genetic variation in growth traits and stem-branch characteristics and their relationships to *Eucalyptus* clones. *Journal of Forest Research*, 26(4), 957–962. doi: 10.1007/s11676-015-0092-2
- Soares, F. A. A. M. N., Flôres, E. L., Dias, C. C., Arantes, C. G. & Paschoarelli, V. A. C. (2011). Recursive diameter prediction and volume calculation of eucalyptus trees

using multilayer perceptron networks. *Computer and Electronics in Agriculture*, 78, 19–27. doi:10.1016/j.compag.2011.05.008

Swain, T. L., Verry, S. D. & Laing, M. D. (2013). A comparison of the effect of genetic improvement, seed source and seedling seed orchard variables on progeny growth in *Eucalyptus nitens* in South Africa. *Tree Genetics and Genomes*, 9, 767–778. doi: 10.1007/s11295-013-0593-0

Turnbull, J. W. (1999). Eucalypt plantations. *New Forest*, 17, 37–52. doi: 10.1007/978-94-017-2689-4

White, T. L., Adams, T. W. & Neale, D. B. (2007). *Forest Genetics*. Cambridge, M. A.: CABI Publishing.

CAPITULO II. ANATOMÍA DE MADERA DE *E. grandis*

2.1. RESUMEN

La madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden tiene densidad básica media, por lo que se emplea para diversos fines, sin embargo, su principal destino es la pulpa para papel cuando se trata de madera juvenil. La homogeneidad de la materia prima uniformiza el producto y reduce el impacto operacional. El objetivo de la presente investigación fue estudiar la variación de las fibras en longitud (LF), diámetro (DF), diámetro de lumen (DL) y grosor de pared (GP); la calidad de la pulpa con la relación de Runkel (RR), coeficiente de flexibilidad (CF), índice de esbeltez (IE) y Coeficiente de rigidez (CR) y la densidad básica de la madera (Db), para identificar los individuos más prometedores de una muestra de árboles destacados por su crecimiento a los 6 años. La viruta tomada de cada árbol a 1.30 m se segmentó cada 2 cm, con una mitad se obtuvo la densidad de la madera en sentido radial y con la otra mitad se preparó un disociado para analizar las dimensiones de las fibras. Se obtuvo diferencia estadística significativa en las dimensiones de las fibras entre árboles y dentro de árboles en sentido radial ($p < 0.0001$). LF (884.6 μm), DF (18.4 μm), DL (12.8 μm) y GP (3.3 μm). En términos de la calidad de la pulpa la madera es uniforme y proveen buena calidad de pulpa (RR de 0.53 a 0.85). La Db es media con 41 g cm^{-3} . La variación radial se debe a las necesidades de estructura y soporte del árbol conforme crece y el estado juvenil de la madera, ya que no ha alcanzado la estabilización de las dimensiones de las fibras ni tiene la densidad de madera de árboles maduros.

Palabras clave: Variación radial, fibras, densidad básica, índices de calidad de pulpa.

2.2. ABSTRACT

The basic density mean of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood is 0.41 g cm^{-3} , then it is useful for many purposes, but, it is mainly used for pulp. The homogeneity of the pulp causes uniform product and best operational efforts. This research is dealing with the radial variation of the fibers in length (LF), diameter (DF), lumen diameter (DL) and wall thickness (GP); the pulp quality was measured with Runkel ratio (RR), flexibility rate (CF), slender ratio (IE) and stiffness rate (CR), also the basic density of the wood (Db) to identify the best trees in a sample of 10 trees which growth at 6 years was larger than the mean performance. The sample of wood of every tree was taken at 1.30 m and it was divided in sections with 2 cm in length; with a section Db was measured and with the other one was made the fibers dissociation to measure their dimensions. There was a statistically significant difference among trees and within trees ($p < 0.0001$). LF mean was $884.6 \text{ }\mu\text{m}$, DF was $18.4 \text{ }\mu\text{m}$, DL was $12.8 \text{ }\mu\text{m}$ and GP was $3.3 \text{ }\mu\text{m}$. The pulp quality was almost uniform for every studied index, then wood was evaluated good for pulp, with RR between 0.53 and 0.85. The Db was medium with 0.41 g cm^{-3} . The radial variation in fibers and Db observed is due to the need for structure and support according with tree growth. Furthermore, wood is juvenile since fibers stabilization on fibers dimensions is not acquired neither Db correspond to a mature tree.

Key words: radial variation, fibers, basic density, pulp quality index

2.3. INTRODUCCIÓN

Eucalyptus grandis Hill ex Maiden es ampliamente cultivado en el mundo, debido a que la madera con densidad media es apta para varios productos como: madera para aserrío, postes para mina, leña, carbón (Campinhos, 1999; Turnbull, 1999), construcción de viviendas con sistemas livianos, muebles rústicos y de calidad, así como tableros, chapa y revestimientos (Sánchez, 2012), aunque la madera es juvenil se destina principalmente como pulpa para papel (Du Plessis & Kotze, 2011; Nichols, Smith, Grant & Glencross, 2010).

La propiedad más importante de la madera es la densidad básica, pues tiene efecto importante en el uso final (Schimleck & Clark III, 2008), refleja la cantidad de materia seca disponible en un determinado volumen de madera y se relaciona directamente con la resistencia mecánica de la madera (Doldán, 2003). Aunque en la elaboración de pulpa para papel las dimensiones de las fibras son importantes (Igartúa, Monteoliva, Monterubbianesi & Villegas, 2002), también la presencia y proporción de otras células que forman el tejido fibroso influyen en el comportamiento y propiedades del papel (Núñez, 2005), sin embargo, es posible calificar la calidad de madera para pulpa para papel a través de distintos índices, los cuales corresponden a la relación entre las dimensiones de las fibras (Ohshima, Yokota, Yoshizawa & Ona, 2005; Pirralho et al., 2014; Tamarit, 1996).

En el género *Eucalyptus* se ha observado un patrón de variación significativo en sentido axial y radial para densidad de madera y propiedades de las fibras (Igartúa & Monteoliva, 2010; Ohshima et al., 2005; Omonte & Valenzuela, 2011; Palermo, Latorraca, Carvalho,

Calonego & Severo, 2015; Raymond & MacDonald, 1997), aunque en otras ocasiones no es posible observar una tendencia definida (Downes et al., 1997; Miranda & Pereira, 2002), esto depende principalmente de la edad del árbol y de la formación de madera de juvenil-transición-madura (Palermo et al., 2015), aunque también influyen las condiciones ambientales (Miranda & Pereira, 2002; Wimmer, Downes, Evans & French, 2008).

Para determinar la calidad de la madera es importante cuidar aspectos tales como presencia de daño, forma y rectitud del fuste a fin de inferir la calidad promedio de un árbol utilizando un punto de muestreo (Raymond & MacDonald, 1997; Igartúa et al., 2002; Aggarwal & Chauhan, 2013), ya que se ha observado que no existe variación en la densidad básica entre orientaciones opuestas (Igartúa et al., 2002; Raymond & Muneri, 2001).

En 2008 se estableció un ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis*, como parte de un programa de mejoramiento genético, por lo que esta investigación tiene como objetivo determinar la variación radial en la calidad de la madera mediante el análisis de las características anatómicas de las fibras, índices de calidad de pulpa para papel y densidad básica, de árboles seleccionados en el estudio de progenies de *E. grandis*, e identificar los individuos más prometedores para la producción de pulpa para papel.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se realizó en el ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis* (EPG) ubicado en la localidad de María Lombardo de caso, Oaxaca, en terrenos propiedad de la empresa Plantaciones de Tehuantepec, S.A. de C.V. (PLANTEH), km 110 de la carretera federal Tuxtepec-Palomares. El clima es cálido húmedo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015); con temperatura media anual de 25.8 °C; precipitación media anual de 1 668.5 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2015) y 124.5 de altitud. El arbolado, de pedigrí incompleto, se integra por los 25 hijos fenotípicamente mejores de cada una de las 49 familias de cuatro fuentes: dos áreas semilleras (AS01 y AS02) y árboles “plus” seleccionados con anterioridad en PLANTEH, y de un programa de mejoramiento genético en Argentina (ARG) (Cuadro 2.1). La AS01 y AS02 difieren en densidad de árboles madre, aproximadamente 100 árboles ha⁻¹ para la primera y alrededor de 150 árboles ha⁻¹ para la segunda. Los mejores hijos se establecieron en 25 bloques completos al azar en los que se representa cada familia por un árbol, para un total de 1 225 árboles en marco real de 3 x 3 m. El EPG se delimitó con una franja de protección de dos hileras de árboles de ARG de buena calidad fenotípica.

Cuadro 2.1. Número de familia dentro de fuente en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fuente	Nomenclatura de familias
AS01	1-12
AS02	13-24
PLUS	25-36
ARG	37-49

Nota: AS01: Área semillera 01; AS02: Área semillera 02; PLUS: Árbol plus; ARG: De Argentina

Selección de árboles

Los datos de altura, diámetro (normal y a la base) a los 6 años de plantación se tomaron con altímetro “Haga” y cinta diamétrica “Forestry Suppliers 2830”, respectivamente, mientras que el volumen se obtuvo mediante el modelo Schumacher:

$$VOL_i = (0.000037) * (DN_i^{1.908525}) * (AT_i^{1.056786})$$

Donde: VOL_i = Volumen individual (m^3); DN_i = Diámetro normal (cm); AT_i = Altura total (m)

Los datos se ajustaron por el efecto del bloque siguiendo un procedimiento similar al empleado por Valencia, Vargas, Molina y Jasso (1996); y se analizaron con el método REML de SAS (SAS Institute, 2002) empleando el modelo mixto:

$$Y_{ijk} = FTE_i + REP_j + (FTE_i) * (REP_j) + [FAM_k(FTE_i)]$$

Donde: Y_{ijk} = Vector de observaciones de variable (A, DN, DB o V) de la fuente “i” de la repetición “j”; FTE_i = Factor fijo de la i-ésima fuente, REP_j = Factor fijo repetición o bloque “j”; $(REP) * (FTE)$ = Factor fijo de interacción de la repetición “j” y la fuente “i”; $[FAM_k(FTE_i)]$ = Factor aleatorio de familia “k” dentro de fuente “i”.

Las mejores familias dentro de cada fuente se identificaron por el promedio en altura, diámetro y volumen ajustado con el estimador obtenido del análisis de varianza. Dentro de esas familias se eligieron 10 árboles prominentes sin cancro (*Chrysoportha cubensis* Gryzenhout & M.J. Wingf.): Dos individuos para las dos familias sobresalientes y un individuo para el resto (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Árboles seleccionados para análisis de madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fuente	Familia	Árboles/familia
AS01	9 y 2	1
AS02	14 y 17	2
Plus	34, 35 y 36	1
Arg	42	1

Colecta y manejo de las muestras de madera

En mayo 2015 (a los 7 años de plantación) se tomaron muestras de madera, de los árboles seleccionados, con un taladro de Pressler de 5 mm de diámetro, a 1.30 m del nivel del suelo, con orientación norte (Figura 2.1). Se mantuvieron debidamente etiquetadas en una pajilla de plástico, dentro de una botella con agua para mantener la humedad a saturación. El líquido se cambió cada tercer día hasta trabajar el material en

el laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la Universidad Autónoma Chapingo.



Figura 2.1. Extracción no destructiva de la muestra de madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

La viruta se dividió en segmentos de 2 cm de longitud a partir del extremo exterior, sin considerar la corteza, hasta la médula. Cada árbol presentó de 6 a 7 secciones, las cuales se partieron por la mitad en sentido longitudinal y se les asignó un número conforme se fueron fraccionando para tener control durante el procesamiento de las muestras. Una porción de cada sección se utilizó para determinar la densidad básica y la otra para estudiar las dimensiones de las fibras.

Determinación de la densidad básica de la madera

Se tomó el volumen verde de cada segmento con el método de Arquímedes con apoyo de una balanza electrónica (Ohaus, con precisión de 0.01 g, United States of América). Se obtuvo el peso anhidro después de colocar las muestras en una estufa de secado (Riossa, México) a $100\pm 3^{\circ}\text{C}$ y observar peso constante. Los datos obtenidos se utilizaron en la fórmula:

$$(Db) = \frac{Po}{Vv}$$

Donde: Db= Densidad básica; Po = peso anhidro (g) y Vv= volumen verde (cm^3)

Características anatómicas de la madera

El material se disoció con agua oxigenada y ácido acético glacial (1:1) y se depositaron en una estufa de secado durante 24 h a $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$, se enjuagó hasta eliminar la solución usada para la disociación, se tiñó con pardo de Bismark por 2 h, se eliminó el exceso de tintura con agua destilada. Posteriormente se elaboraron preparaciones temporales para observar al microscopio, tomar imágenes y medir la longitud (LF), diámetro total (DF) y de lumen (DL) de las fibras y el grosor de la pared (GP), por diferencia de diámetros, empleando una cámara digital adaptada a un equipo de cómputo con el paquete LAS EZ (Leica Application Suite, 2013).

Se obtuvieron varianza y coeficiente de variación de las dimensiones de las fibras de un árbol seleccionado al azar, con nivel de confianza de 95% y error del 5%, para definir el tamaño final de la muestra a través de la fórmula:

$$\text{Tamaño de muestra} = [(Z) (\text{coeficiente de variación}) / \text{error}]^2$$

Donde: Z= 1.96 con nivel de confianza de 95%, Coeficiente de variación = varianza * media, y Error= 5.0 %

El número de fibras a medir fue de 30, obteniendo las lecturas de 10 fibras en 3 repeticiones al azar (portaobjetos).

Índices de calidad de pulpa para papel

Una vez obtenidas las dimensiones de las fibras en cada sección, se calcularon los siguientes índices de calidad de pulpa para papel:

Coeficiente de rigidez (CR) $CR = GP / DF$

Relación de Runkel (RR) $RR = GP / DL$

Coeficiente de flexibilidad (CF) $CF = DL / DF$

Coeficiente de Petri o índice de esbeltez (IE) $IE = LF / DF$

Análisis estadísticos

Se realizó regresión lineal de las variables respuestas consideradas en las características anatómicas de la madera: Longitud de fibra (LF), diámetro de fibra (DF), diámetro de lumen (DL), grosor de pared (GP), así como de la densidad básica de la madera (Db). El modelo mixto consideró a los factores sección y árbol de efecto fijo, y la interacción sección * árbol de efecto aleatorio, para determinar el efecto de la posición radial y el árbol como individuo, la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) permitió detectar diferencias significativas a nivel de árbol y posición radial (secciones). Los índices de calidad de pulpa se compararon con las escalas establecidas en la literatura para definir el rango en el cual se ubican los árboles considerando el valor promedio de todos los segmentos analizados.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad básica de la madera

Las muestras analizadas presentaron densidad básica (Db) entre 0.33 y 0.52 g cm⁻³, con promedio de 0.41 g cm⁻³ (Cuadro 2.3), lo cual indica que la densidad se encuentra en una categoría de baja a media (Santiago, Guevara & Espinoza, 2013). Cassidy, Palmer y Smith (2013) observaron *Eucalyptus pilularis* a los 7 años densidad de 0.02 a 0.46 g cm³ en y en el caso de *E. urograndis* a los 5 y 6 años fue de 0.44-0.55 g cm³ (Sharma, Suckla, Shashikala & Sri Poornima 2015), resultados similares a lo encontrado en este estudio.

La Db presenta tendencia de incremento de la médula hacia la corteza. Este patrón de variación fue observado por Doldán (2003), obteniendo valores de entre 0.34 a 0.56 g cm³ en *E. grandis* a los 18 años. En *E. globulus* Igartúa & Monteoliva (2010) hallaron densidad de 0.49-0.54 g cm³ a los 7 años en Argentina, mientras que para clones de *E. tereticornis* a los 5 años en India, Aggarwal y Chauhan (2013) obtuvieron variación de 0.548 a 0.593 g cm³.

Las diferencias en la Db con respecto a otros trabajos realizados con *E. grandis* pueden deberse a factores climáticos (temperatura, precipitación y humedad relativa), edad (Sette, Tomazello, Lousada, Lopes & Laclau, 2016) y fertilidad del suelo, puesto que Wimmer et al. (2008) en clones de *E. globulus* a los 8 años obtuvieron 11.0 % mayor densidad en sitios pobres.

Características anatómicas de la madera

La magnitud promedio de las fibras (Cuadro 2.3) obtenido para longitud de fibra (LF) fue de 884.6 μm , que corresponde a fibras cortas (Tortorelli, 1956); el diámetro de fibra (DF) fue 18.4 μm ; el diámetro del lumen (DL) 12.0 μm , mientras que el grosor de la pared (GP) fue 3.3 μm , considerada como pared delgada de acuerdo con la clasificación de la International Association of Wood Anatomist Committee (1989).

Las dimensiones de las fibras son similares a las encontradas por otros autores, puesto que la LF reportada por Doldán (2003) para *E. grandis* varió en promedio de 650 a 1 100 μm en árboles de 18 años en Uruguay, mientras que Foelkel (2007) reporta para el género un rango promedio de 600 a 850 μm de LF y GP de 2.5 a 5.0 μm .

Sharma et al. (2015) encontraron en dos clones del híbrido *E. urograndis* de una plantación en India, un promedio de LF de 980 y 1 006 μm , DF de 15.2 y 15.7 μm , GP de 5.1 a 5.6 μm y DL de 10.1 μm , para cada clon a los 5 y 6 años de plantación. Mientras que para el híbrido *E. grandis* x *E. tereticornis* las dimensiones promedio fueron en LF 950 μm , DF 13 μm y GP de 2.3 μm a los 6 años, en Argentina (Sánchez, 2012).

Cuadro 2.3. Prueba de Tukey de las dimensiones de las fibras y densidad básica por familia y sección en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fam	LF	DF	DL	GP	Db
2A36	814.7 d	16.9 d	10.8 de	3.0 de	0.39 d
1A34	905.6 abc	18.3 c	12.0 bc	3.1 cde	0.42 b
4E2	902.3 abc	18.0 c	12.0 bc	3.0 de	0.38 e
4C14	895.6 bc	19.6 ab	13.2 a	3.2 bcd	0.36 g
3B17	923.8 ab	17.9 cd	11.7 bcd	3.1 cde	0.37 f
3A14	941.9 a	18.5 c	12.6 ab	2.9 e	0.42 b
2B42	915.6 abc	18.7 bc	12.1 bc	3.3 bc	0.38 e
2B35	831.5 d	18.3 c	11.4 cd	3.5 ab	0.40 c
2B17	815.5 d	20.1 a	13.2 a	3.4 b	0.43 b
2A9	879.7 c	17.6 cd	10.2 e	3.7 a	0.49 a

Sección	LF	DF	DL	GP	Db
1	749.5 f	17.3 d	11.2 c	3.0 d	0.36 f
2	763.8 f	17.5 d	11.7 bc	2.9 de	0.38 f
3	825.2 e	17.7 cd	12.1 ab	2.8 e	0.38 e
4	894.8 d	18.3 bc	12.6 a	2.9 de	0.39 d
5	928.4 c	19.1 ab	12.6 a	3.3 c	0.40 c
6	970.5 b	19.4 a	12.0 abc	3.7 b	0.44 b
7	1006.3 a	19.2 a	11.3 c	3.9 a	0.46 a

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($\alpha= 0.05$). La sección 1 es la más cercana a la médula.

Para otras especies del género como *E. globulus*, LF fue de 670 μm , DF de 16 μm y GP de 3 a 5 μm a la altura de 1.30 m en árboles de 4 años de un campo experimental en Portugal (Pirralho et al., 2014). Por su parte, Rao et al. (2002), encontraron para 5 clones de *E. tereticornis* de 4.5 años que el promedio en LF varió de 848 a 938 μm ; en DF de 14.5 a 16.9 μm ; en DL de 8 a 9.1 μm y en GP de 5.9 a 8 μm .

Las diferencias en las dimensiones de las fibras en comparación con otros autores pueden deberse a la especie, efecto de los factores climáticos y la edad. De Castro et al. (2015) estudiaron el efecto de la disponibilidad hídrica y fertilización en LF, DL y GP, en árboles de *E. grandis* de entre los 2 y 3 años de plantación, pero solo a los 2 años se obtuvieron diferencias significativas en las variables medidas, sin embargo, para LF solo se presentó entre régimen hídrico, obteniendo mayores dimensiones con mayor disponibilidad de lluvia (20.1 μm), mientras que la adición de sodio favoreció a DL (12.4 μm) con el máximo de lluvia, pero no a GP, reduciéndolo en los dos regímenes hídricos probados.

Aunque Wimmer et al. (2008) obtuvieron fibras más cortas en sitios pobres en clones de *E. globulus* a los 8 años, Chandrasekhara, Pandalai, Dhamodaran y Sankaran (2013) no observaron diferencias significativas en la adición de N y deshierbe en árboles de 6.5 años de *E. grandis* y *E. tereticornis*. Lo antes mencionado sugiere que las variaciones entre precipitación y disponibilidad de nutrientes, así como la especie y edad pueden ocasionar diferencias en las características de interés.

La importancia de las dimensiones de las fibras radica en su impacto en la calidad del papel, se requieren fibras cortas para mayor rendimiento de la pulpa (Toval, 2010), aunque las fibras largas influyen de manera lineal con la resistencia al rasgado, por el aumento de la superficie de contacto de fibra-fibra, y la resistencia al doblado del papel. El diámetro de las fibras y el diámetro del lumen, por su parte, influyen también en la rigidez, flexibilidad y área de contacto entre fibras. Las paredes delgadas dan mejor formación a la hoja de papel, ya que las paredes se colapsan con la fuerza y presión aplicada durante la manufactura del papel, generando mayor superficie de contacto entre

fibras, por tanto, mayor resistencia (Foelkel, 2007), además de dar una excelente textura, buena densidad y propiedades ópticas deseables para la impresión y escritura (Schimleck & Clark III, 2008).

En el caso de *E. grandis*, en esta investigación, las dimensiones de las fibras variaron con significancia estadística ($p < 0.0001$) entre los individuos. El individuo con mayor LF fue 1A34, mientras que 2B17 presentó mayor DF; 4C14 y 2B17 con mayor DL y con menor GP el árbol 3A14 (Cuadro 2.3).

También se encontraron diferencias significativas entre las secciones y tendieron a incrementar de la médula hacia la corteza en LF, DF y GP, mientras que DL presentó también algunas variaciones (Cuadro 2.3). La tendencia de LF y GP también fue encontrada en *E. grandis* por Chandrasekhara et al. (2013) y Doldán (2003); en *Eucalyptus camaldulensis* y *E. globulus* por Ohshima et al. (2005) y en *E. globulus* ssp. *globulus* por Igartúa et al. (2002).

Esta tendencia de incremento radial en LF y GP, se debe a la necesidad de mayor soporte en el tallo conforme se presenta el crecimiento en altura (Núñez, 2007). Después de un periodo de variación se espera estabilización de las dimensiones, tal como lo indican Palermo et al. (2015), quienes observaron que entre 8 y hasta 13 años se encuentra la madera de transición juvenil-madura y posteriormente la madera madura bien definida en *E. grandis*, mientras que Ramos et al. (2011) encontraron madera de transición entre los 5 y 11 años en esa especie, mientras que por su parte, Bisset y Dadswell (1949) estudiaron árboles de 50 años y encontraron que alrededor de los 8 años en *Eucalyptus regans* el tamaño de las fibras ya no variaron.

El comportamiento de las dimensiones de las fibras y la densidad básica presentan la misma tendencia en sentido radial, debido a que la Db depende de las dimensiones y proporción de fibras (Klepac, 1983).

Índices de calidad de pulpa

Los índices de calidad de pulpa para papel son útiles para determinar la calidad de la materia prima, por ejemplo, la relación de Runkel (RR) define la conformación del papel y rendimiento de la pulpa; el índice de esbeltez (IE) influye en la densidad de la hoja de papel y la digestibilidad de la pulpa (Ohshima et al., 2005), constituyendo una pulpa de excelente calidad cuando las fibras presentan paredes delgadas y por tanto alcanzan valores bajos de RR y coeficiente de rigidez (CR). En el coeficiente de flexibilidad (CF) las fibras más delgadas se colapsan permitiendo buena unión de las fibras y por tanto, dan al papel mayor resistencia al rasgado; mientras que CR se relaciona con el grosor de la pared, influyendo en la unión entre fibras, por tanto, menor volumen, mayor resistencia a la tensión, explosión y rasgado (Villaseñor y Rutiaga, 2000). Por otro lado, el IE indica la resistencia al rasgado; al relacionarse la longitud de la fibra, los valores altos implican menor resistencia a la ruptura.

El CR varió entre 0.33 y 0.42; el CF entre 0.58 y 0.66, el IE entre 40.69 y 52.24, mientras que la RR fue de 0.53 a 0.85.

De acuerdo con la escala de CR e IE, el valor se considera como medio; el CF va de medio a delgado, por lo que hay buena unión de fibra-fibra (Villaseñor y Rutiaga, 2000), además, de acuerdo con Larios (1979), la RR encontrada corresponde a una materia

prima buena para la elaboración de papel. La pulpa es de calidad para papel cuando muestra valores altos en CF y valores bajos en CR, IE y RR (Tamarit, 1996), como lo obtenido en el presente estudio (Cuadro 2.4).

Debido a que los índices califican la madera por rangos de valores, las muestras estudiadas reciben prácticamente la misma calificación, de acuerdo a las escalas específicas de cada índice. Los árboles aún presentan madera juvenil, debido a que existe variación en las dimensiones de las fibras y esto se refleja en los índices de calidad de pulpa.

A pesar de que los resultados indican que la madera de los árboles analizados es buena para la producción de pulpa, es importante considerar que para cada clase de papel se requieren determinadas propiedades de la madera, aunque los procesos para obtener la pulpa y elaborar el papel, también influyen en la calidad del producto final (Foelkel, 2007; Tamarit, 1996).

Cuadro 2.4. Prueba de Tukey para índices de calidad de pulpa por familia y sección en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fam	CR	RR	IE	CF
2A36	0.36 bcd	0.63 bc	49.2 bc	0.64 bcd
1A34	0.34 cde	0.55 bc	50.3 ab	0.66 abc
4E2	0.34 cde	0.54 bc	50.8 ab	0.66 abc
4C14	0.33 de	0.53 c	46.9 c	0.67 ab
3B17	0.35 cde	0.58 bc	52.9 a	0.65 abc
3A14	0.32 e	0.55 bc	52.5 ab	0.68 a
2B42	0.36 bc	0.64 bc	51.0 ab	0.64 cd
2B35	0.38 b	0.67 b	46.4 c	0.62 d
2B17	0.35 cde	0.60 bc	41.7 d	0.65 abc
2A9	0.43 a	0.85 a	50.9 a	0.57 e

Sección	CR	RR	IE	CF
1	0.36 b	0.61 b	44.2 d	0.64 b
2	0.34 bc	0.55 bc	44.9 d	0.66 ab
3	0.32 c	0.49 c	47.8 c	0.68 a
4	0.32 c	0.49 c	50.2 bc	0.68 a
5	0.35 b	0.58 bc	50.1 bc	0.65 b
6	0.39 a	0.75 a	51.6 b	0.61 c
7	0.42 a	0.80 a	54.4 a	0.58 c

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($\alpha= 0.05$). La sección 1 es la más cercana a la médula.

Correlación entre características anatómicas y densidad básica

El análisis de correlación entre dimensiones de las fibras (Cuadro 2.5), muestra que es significativa y positiva, excepto entre DL con GP y Db, como es de esperarse, ya que fibras con mayor lumen tienden a presentar paredes más delgadas e influye la densidad de la madera. Esto afecta en los índices de calidad de pulpa RR y CF porque ambos dependen de GP para obtener valores elevados.

Por otro lado, la correlación LF-DF, así como LF-GP y DF-GP es moderada y alta entre DF-DL. Esto sugiere que las fibras más largas pueden o no presentar mayor diámetro y grosor de pared, pero, a mayor diámetro de fibra, mayor diámetro de lumen y las paredes tienden a ser más delgadas.

La Db se correlaciona de forma negativa con DL y positiva con LF, DF y GP. Esto refleja que la densidad está directamente relacionada con dichas variables, como lo indica Klepac (1983). Sin embargo, Doldán (2003) encontró que la relación entre la Db y la LF es baja, puesto que no observó tendencia definida en la madera juvenil ni en la madura, aunque al separar los datos de cada árbol si se obtuvo porque Db presentó variaciones más pronunciadas que LF entre árboles.

Cuadro 2.5. Correlación entre características anatómicas, índices de calidad de pulpa y densidad básica a los 6 años para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

	LF	DF	DL	GP
DF	0.34367	—		
DL	0.16126	0.85138	—	
GP	0.35146	0.33062	-0.21300	—
Db	0.29914	0.6809	-0.14193	0.38220

Nota: Significativo ($p < 0.0001$)

2.6. CONCLUSIONES

En estos períodos de crecimiento dado que se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en la densidad básica y las dimensiones de las fibras en sentido radial, son típicas de la madera juvenil, no debe ser usada para el aserrío.

Abundando en lo anterior, dado que la densidad básica presentó correlación alta y positiva con las dimensiones de las fibras, cuando éstas son cortas y delgadas o con lumen amplio, se afecta negativamente la densidad de la madera y por lo tanto la madera no debe ser usada para productos en escuadría.

Sin embargo, dado que los valores medios de los índices de calidad de la pulpa para papel obtenidos, indican que la madera de los árboles estudiados es de buena calidad para la producción de pulpa para papel, el arbolado de las plantaciones circundantes deben ser utilizadas para este fin.

2.7. LITERATURA CITADA

- Aggarwal, P. & Chauhan, S. (2013). Longitudinal growth strains in five clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Journal of Forestry Research*, 24(2), 339-343. doi:10.1007/s11676-013-0358-5
- Bisset, W. J. & H. E. Dadswell. (1949). The variation of fiber length within one tree of *Eucalyptus regans*, F. v. M. *Australian Forestry*, XIII (2): 86-96. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.1949.10675274>
- Campinhos, E. (1999). Sustainable plantations of high-yield Eucalyptus trees for production of fiber: The Aracruz case. *New Forest*, 17, 129-143. doi: 10.1007/978-94-017-2689-4
- Cassidy, M., Palmer, G. & Smith, R. G. B. (2013). The effect of wide initial spacing on wood properties in plantation grown *Eucalyptus pilularis*. *New Forest*, 44, 919-936. doi:10.1007/s11056-013-9385-5
- Chandrasekhara, P. P. K., Pandalai, R. C. Dhamodaran, T. K. & Sankaran, K. V. (2013). Effect of silvicultural practices on fiber properties of *Eucalyptus* wood from short-rotation plantations. *New Forest*, 44:521-532. doi: 10.1007/s11056-012-9360-6.
- De Castro, F. P., Sette, C. R. Jr., Resende de C., V., Chaix, G., Laclau, J. P. & Tomazello, F. M. (2015). Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 39(2):405-416. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000200020>

- Doldán, J. (2003). Indicadores de calidad de madera *Eucalyptus grandis* de Río Negro, Uruguay. Informe de investigación No.9. Proyecto LATU-JICA. Uruguay: Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)-Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).
- Downes, G. M., Hudson, I. L., Raymond, C. A., Dean, A. J., Michell, A. J., Schimleck, L. R., Evans, R. & Muneri, A. (1997). *Sampling Eucalypts for wood and fiber properties*. Australia: CSIRO Publishing.
- Du Plessis, M. & Kotze, H. (2011). Growth and yield models for *Eucalyptus grandis* grown in Swaziland. *Southern Forest*, 73(2), 81–89. doi: 10.2989/20702620.2011.610873
- Foelkel, C. (2007). *The Eucalyptus fibers and the Kraft pulp quality requirements for paper manufacturing*. Brasil: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Mapa digital de México V6.1. Climas (1921-1975). 20-12-2016 en <http://gaia.inegi.org.mx/>
- International Association of Wood Anatomist Committee (IAWA). (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification with an Appendix on non-anatomical information. Bulletin n. s. 10 (3): 219–332. Netherlands: Autor.
- Igartúa, D. V. y Monteoliva, S. E. (2010). Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque*, 31(2), 150-156. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200008>
- Igartúa, D. V., Monteoliva, S. E., Monterubbianesi, M. G. & Villegas, M. S. (2002). Calidad del leño de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*: II. Variaciones en la densidad

- básica y la longitud de fibras en Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 105(1), 30-39. Obtenido de <http://163.10.24.65/revista/index.php/revagro/article/view/194/112>
- Klepac, D. (1983). *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales* (2da. ed.). Chapingo, México: Escuela Nacional de Agricultura (Universidad Autónoma Chapingo).
- Larios, S. P. (1979). *Índice de calidad de pulpas de dos coníferas*. Tesis profesional. Departamento de Bosques. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Leica Application Suite. (2013). LAS EZ. Versión 3.0.0. Switzerland.
- Nichols, J. D., Smith, R. G. B., Grant, J. & Glencross, K. (2010). Subtropical eucalypt plantations in eastern Australia. *Australian Forestry*, 73, 53–62. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2010.10676310>
- Miranda, I. & Pereira, H. (2002). Variation of pulpwood quality with provenance and site in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science*, 59: 283– 291. doi 10.1051/forest:2002024
- Núñez, C. E. (2005). Caracteres biométricos y composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* implantado en la Mesopotamia argentina. *Proceedings*. Terceras Jornadas Científico Tecnológicas de la Universidad de Misiones y Quintas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Posadas. Argentina.
- Núñez, C. E. (2007). Morfología fibrosa de la madera de *Eucalyptus grandis* implantado en la Mesopotamia Argentina. 1. Atributos biométricos. *Revista de Ciencia y*

Tecnología, 9 (9): 38-43. Obtenido de <http://www.cenunez.com.ar/archivos/113-QMQ81Rev.Cienc.Tecnol92007.pdf>

- Omote, M. & Valenzuela, L. (2011). Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regans* de 16 años. *Maderas. Ciencias y tecnología*, 13(2):211-224. doi:10.4067/S0718-221X2011000200009
- Ohshima, J., Yokota, S., Yoshizawa, N. & Ona, T. (2005). Examination of within-tree and variations and the heights representing whole-tree values of derived wood properties for quasi-non-destructive breeding of *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus globulus* as quality pulpwood. *J. Wood Science*, 51, 102-111. doi:10.1007/s10086-004-0625-3
- Palermo, G. P de M., Latorraca, J. V. de F., de Carvalho, A. M., Calonego, F. W. & Severo, E. T. D. (2015). Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *European Journal Wood Production*, 73, 775-780. doi:10.1007/s00107-015-0947-4
- Pirralho, M., Flores, D., Sousa, V. B., Quilhó, T., Knapic, S. & Pereira, H. (2014). Evaluation on paper making potential of nine *Eucalyptus* species based on wood anatomical features. *Industrial crops and products*, 54, 327-334. V. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.040>
- Ramos, L. M. A., Latorraca, J. V. F., Pastro, M. S., Souza, M. T., Garcia, R. A., Carvalho, A. M. (2011). Radial variation of wood anatomical characters of *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden and age of transition between adult and juvenile wood. *Scientia Forestalis* 39(92):411–418. doi: 10.1007/s00107-015-0947-4

- Rao, R.V. Shashikala, S. Sreevani, P. Kothiyal, V., Sarma, C. R. & Lal, P. (2002). Within tree variation in anatomical properties of some clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Wood Science and Technology* 36, 271-285. doi: 10.1007/s00226-002-0139-3
- Raymond, C. & MacDonald, A. (1997). Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forest*, 15, 205-221. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006544918632>
- Raymond, C. A. & A. Muneri. (2001). Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* for wood properties. I. Basic density. *Wood Science and Technology* 35: 27-39. doi: 10.1007/s002260000078
- Santiago, P., Guevara, S. C. & Espinoza, L. M. (2013). *Manual de transformación de la madera*. Perú, Lima: Ministerio de Agricultura-Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre.
- Schimleck, L. R. & Clarck III, A. (2008). Wood quality. In F., Cubbage, E. Sills, P. Mac Donagh, C. McDermott, C. Oliver & A. Higa (Eds.), *Forest and Forestry in the Americas: An encyclopedia*. EUA: North Carolina State University.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2015). Normales climatológicas. Normales 1951-2010. 20-12-2016 en <http://smn.cna.gob.mx/>
- Sette, C. R., Tomazello, F. M., Lousada, J. L., Lopes, D. & Laclau, J. P. (2016). Relationships between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. *Revista Árvore*, 40(2):337-346. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000200016>

- Sharma, S. K., Shukla, S. R., Shashikala, S. & Sri Poornima, V. (2015). Axial variations in anatomical properties and basic density of *Eucalypt urograndis* hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) clones. *J. For. Res.*, 26(3), 739-744. doi:10.1007/s11676-015-0080-6
- Sánchez, A. M. M. (2012). *Caracterización de la madera del nuevo híbrido Eucalyptus grandis, Hill ex Maiden x Eucalyptus tereticornis, Smith, su aptitud de usos en Argentina*. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid. Palencia, España.
- SAS Institute. (2002). The SAS system for Windows. Release. SAS Institute, Cary, N.C.
- Tamarit, U. J. C. (1996). Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. *Madera y Bosques*, 2(2), 29-41. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61720204>
- Tortorelli, L. A. (1956). *Maderas y bosques argentinos*. Buenos Aires, Argentina: Acme
- Toval, G. (2010). Calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* como materia prima para la industria pastero-papelera. Boletín de CIDEU. Galicia, España: Centro de Investigación Forestal de Lourizán.
- Turnbull, J. W. (1999). Eucalypt plantations. *New Forest* 17, 37-52. doi:10.1007/978-94-017-2689-4
- Valencia, M. S., Vargas, H. J., Molina, G. J. D. & Jasso, M. J. (1996). Control genético de la velocidad de crecimiento y características de la madera de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 30(2):265-273. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>

Villaseñor, A. J. C. & Rutiaga, Q. J. G. (2000). La madera de *Casuarina equisetifolia* L., química e índices de calidad de pulpa. *Madera y bosques*, 6(1):29-40. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/617/61760103/>.

Wimmer, R., Downes, G., Evans, R. & French, J. (2008). Effects of site on fiber, Kraft pulp and hand sheet properties of *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science*, 65(602). doi:10.1051/forest:2008039

CAPÍTULO III. PARAMETROS GENÉTICOS DE CRECIMIENTO PARA UN ENSAYO DE PROGENIES DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

3.1. RESUMEN

Los parámetros genéticos son parte esencial del proceso de domesticación y mejora para la toma de decisiones acerca del avance y complementación de cualquier programa de mejoramiento genético forestal. El objetivo de la presente investigación fue estimar los parámetros genéticos con los datos de las mediciones a los 4, 5 y 6 años en altura (A), diámetro normal y a la base (DN y DB) y volumen (V), para con base en los resultados, convertir o no el ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis*, en un huerto semillero (HSS) y así conformar una población selecta para generar la F₂. Se obtuvieron los componentes de varianza; se calculó la heredabilidad en sentido estricto (h^2), la respuesta a la selección del 20.0 % por método individual (R_i), índice combinado (R_I) y dentro de familias (R_w), así como la comparación de la variación en la base genética entre éstos. También se calcularon las correlaciones genéticas (r_g) y fenotípicas (r_p). Las características presentaron heredabilidad baja aunque fue mayor en V (0.23) que en A (0.18). Se obtuvieron 0.17, 0.23 y 0.39 para h^2_w , h^2_i y h^2_I para V6, respectivamente. Los valores de r_g fueron cercanos a 1.0 y para r_p variaron entre 0.5 y 1.0, por lo tanto, la selección en volumen influye en la mejora de las demás características, y el fenotipo es buen indicador del genotipo. La variación fenotípica influyó en la respuesta esperada en V6, obteniendo 9.7, 23.6 y 14.3 %, mientras que la representatividad de familias selectas por cada método fue de 100.0, 73.5 y 89.9 % para R_w , R_i , R_I , por lo que la selección con el índice combinado es la mejor opción de selección para convertir el ensayo de progenies en HSS.

Palabras clave: huerto semillero, heredabilidad, respuesta a la selección, base genética.

3.2. ABSTRACT

Genetic parameters information are essential in domestication and breeding process for planning the direction of a tree improvement program. This investigation is dealing with the genetic parameters to convert or not in a sexual seed orchard (HSS) the progeny test of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and to determine the base population for the next breeding cycle. Trees were measured at 4, 5 and 6 years in height (A), diameter at the breast and diameter at the base (DN and DB), and volume (V). The components of variance obtained, included: heritability (h^2) and genetic gain for individual (R_i), combined index (R_i) and within-family (R_w) selection of 20.0 % of the population were calculated; the genetic base was compared among all of them. Genetic and phenotypic correlations were also estimated (r_g and r_p , respectively) thus volume selection is more convenient than the other characteristics. Growth heritability was low although heritability in V was bigger than in A (0.23 and 0.18, respectively). The values for h^2_w , h^2_i and h^2_i were, 0.17, 0.39 and 0.23 for V6, respectively. The values for r_g were around 1.0; and r_p were within 0.5 to 1.0, therefore selection in volume is positive for selection in other growth characteristics and the phenotype is good indicator of the genotype. The genetic gain R_w , R_i y R_i were 9.7, 17.6 y 14.3 % for V6, respectively while the genetic base in each method were 100.0, 73.5 y 89.8 %, so the combined index selection is the best option for selection to convert the progeny test to HSS.

Key word: seed orchard, heritability, genetic gain, genetic base

3.3. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales constituyen una fuente de materia prima para la industria forestal y fueron desarrolladas como estrategia para incrementar la productividad por unidad de superficie (Vargas, Jasso & Bermejo, 2004). En la década de los 50's, en diversos países se inició el mejoramiento genético forestal como herramienta para obtener poblaciones uniformes, de mayor calidad, resistentes a factores adversos, pero sobre todo, elevar de manera comparativa la productividad respecto al material no mejorado, a través del manejo del componente genético del arbolado de las plantaciones comerciales (Zobel & Talbert, 1988).

La base del mejoramiento genético es la identificación y cruzamiento de los individuos genéticamente superiores, así como el incremento de la diversidad a través de la infiltración génica de poblaciones no emparentadas, con lo que se modifica la frecuencia de alelos deseables que afectan las características económicamente importantes (Vargas, Jasso & Bermejo, 2004).

La efectividad de la selección depende de la variación existente entre individuos y del control genético de la(s) característica(s), puesto que la ganancia genética está en función de ambos parámetros, la primera, por la diferencia entre la media de los individuos seleccionados respecto a la media de toda la población en el carácter seleccionado y la segunda, por la fracción de la variación que puede heredarse a la siguiente generación (Molina, 1992).

Existen diversos métodos de selección y la estrategia a considerar depende de los parámetros de la población en cuestión, pues se pueden usar para predecir como la

selección para una o varias características que pueden afectar en mas o en menos dichas características correlacionadas en la siguiente generación.

En México se han establecido algunos programas de mejoramiento genético de especies coníferas y latifoliadas. De manera particular en el estado de Oaxaca se estableció un Estudio de Progenies con 49 familias de polinización libre de *Eucalyptus grandis*, las cuales incluyeron tres fuentes locales y una cuarta externa, material mejorado de Argentina. Este proyecto se inició con la intención de incrementar la productividad de las plantaciones de la empresa Plantaciones de Tehuantepec (PLANTEH), S.A de C.V. y reducir la incidencia del cancro del eucalipto, enfermedad que afecta severamente a esta especie (Paredes-Díaz, Jasso-Mata, López-Upton & Alvarado-Rosales, 2010). Debido a que los parámetros genéticos son propios de cada población, el presente estudio tuvo como objetivos: Estimar el control genético de las características de crecimiento, a nivel individual y media de familias, así como las correlaciones genéticas y fenotípicas entre caracteres y estimar la ganancia genética potencial, a fin de obtener información para desarrollar una estrategia de selección y convertir el ensayo de progenies en un huerto semillero sexual para producir semilla mejorada genéticamente y así abastecer los programas de plantación con germoplasma de mayor productividad en PLANTEH.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde al ensayo de progenies de *Eucalyptus grandis* (EPG), establecido en 2008, dentro del rancho “Santa Cristina”, centro de operaciones de la empresa PLANTEH, S. A. de C. V., ubicado en María Lombardo de caso, municipio de San Juan Cotzocón, Oaxaca, entre las coordenadas 17° 25.992' L. N. y 95° 23.475' L. O., y 17° 26.042' L. N. y 95° 23.44' L. O., a 120 m de altitud. El ensayo se constituye por 49 familias de polinización libre obtenidas de tres fuentes locales que aportaron 12 familias cada una: dos áreas semilleras (AS01 y AS02), que difieren en el número de árboles dejados en pie, alrededor de 100 para la primera y 150 para la segunda; así como de árboles “Plus”. Para favorecer la variación genética en dicho ensayo se integraron 13 familias externas provenientes de un programa de mejoramiento genético de la misma especie en Argentina. El clima en la zona de estudio pertenece al tipo Am (i): cálido húmedo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015) con lluvias en verano, temperatura media anual de 25.8 °C y precipitación media anual de 1 668.5 mm (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2015), con relictos de vegetación de la selva alta perennifolia (Oros, 2008).

Toma de datos

Se tomaron los registros de árboles sanos, con datos completos a los 4, 5 y 6 años de plantación en altura total (A) y diámetro normal (DN), diámetro a la base (DB), mientras

que el volumen (V) se estimó mediante la fórmula propuesta para la especie en la zona de estudio (Galán, De los Santos & Valdez, 2008). Esta última variable se determinó en decímetros cúbicos para facilitar el manejo de los números.

Análisis estadístico

Los parámetros genéticos se estimaron para cada variable, las cuales se nombraron con un subíndice que indicó el año en el que se midió.

El análisis para determinar los componentes de varianza se realizó mediante el paquete de cómputo SAS (SAS Institute, 2002) con el método REML del procedimiento MIXED, mientras que la varianza de la varianza de familia se obtuvo con la opción “asycov”. El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \text{REP}_i + \text{FTE}_j + (\text{REP}) * (\text{FTE}_{ij}) + [\text{FAM} (\text{FTE})_k] + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = A, DN, DB o V.; REP_i = Factor fijo del i ésima repetición o bloque; FTE_j = Factor fijo de la j ésima fuente (AS01, AS02, PLUS, ARG); $(\text{REP}) * (\text{FTE}_{ij})$ = Efecto de la interacción entre repetición y fuente de la i -ésima repetición de la j -ésima fuente; $(\text{FAM}) * (\text{FTE})_{ijk}$ = Efecto aleatorio de la k ésima familia anidada en la j ésima fuente de la i ésima repetición y ε_{ijk} = Efecto aleatorio del error experimental $\text{REP} * [\text{FAM}(\text{FTE})]$

Parámetros genéticos

La heredabilidad a nivel individual (h^2_{ix}), de medias de familia (h^2_{famx}) y dentro de familia (h^2_w) se obtuvo mediante la fórmula de Falconer y Mackay (1996):

$$h^2_{ix} = \sigma^2_A / (\sigma^2_{fenx}) = 3 * \sigma^2_{famx} / (\sigma^2_{famx} + \sigma^2_{ex})$$

$$h^2_{famx} = \sigma^2_{famx} / (\sigma^2_{ffamx}) = \sigma^2_{famx} / (\sigma^2_{famx} + (\sigma^2_{ex}/n))$$

$$h^2_w = 2 * \sigma^2_{famx} / \sigma^2_{ex}$$

Donde: σ^2_{Ax} = Varianza genética aditiva; σ^2_{fenx} = Varianza fenotípica; σ^2_{famx} = Varianza de familia; σ^2_{ffamx} = Varianza fenotípica de media de familia; σ^2_{ex} = Varianza del error y n = Media armónica del número de árboles por familia =15.7. Para estimar la varianza genética aditiva, se empleó un coeficiente de determinación (C) de 3, considerando que las familias del ensayo de progenies se constituyen por medios hermanos, hermanos completos y autofecundación, por lo que la varianza dentro de familias es de 2/3 de la varianza aditiva (C = 2).

El error estándar de la heredabilidad, se determinó mediante la fórmula de Dickerson (1969):

$$EE(h^2) = \sqrt{\text{var}(q_1)/q_2^2}$$

Por lo que:

$$EE(h^2_{ix}) = \sqrt{3^2 * \sigma^2_{vfamx} / (\sigma^2_{fenx})^2}$$

$$EE(h^2_{famx}) = \sqrt{\sigma^2_{vfamx} / (\sigma^2_{ffamx})^2}$$

$$EE(h^2_w) = \sqrt{2^2 \sigma^2_{vfamx} / (\sigma^2_e)^2}$$

Donde: σ^2_{vfamx} , es la varianza de la varianza de familias, obtenida de la matriz de covarianzas de la opción “asycov” del procedimiento “mixed”. Las demás variables se definieron con anterioridad.

Las correlaciones fenotípicas promedio por familia (coeficientes de correlación de Pearson) se obtuvieron por medio del procedimiento “proc corr” del paquete de cómputo mencionado. Mientras que las correlaciones genéticas se estimaron con la fórmula de Falconer y Mackay (1996):

$$r_{gxy} = Cov_{xy} / \sigma_{famx} * \sigma_{famy} = \{(\sigma_{fam^{(x+y)}}^2 - [\sigma_{famx}^2 + \sigma_{famy}^2]) / 2\} / \sigma_{famx} * \sigma_{famy}$$

Donde: $\sigma^2_{fam(x+y)}$ = Varianza de familia obtenida al sumar “x” e “y”; σ_{fam} = Desviación estándar de familia. La covarianza (Cov) corresponde a la fórmula de White y Hodge (1989).

El error estándar de la correlación genética se calculó con la fórmula de Falconer y Mackay (1996):

$$EE(r_{gxy}) = 1 - r^2_{gxy} * \sqrt{(EE(h^2_{ix}) * EE(h^2_{iy}) / 2 (h^2_{ix} * h^2_{iy}))}$$

Donde: r_{gxy}^2 = Correlación genética al cuadrado; $EE(h_{ix}^2)$ y $EE(h_{iy}^2)$ = error estándar de la heredabilidad individual de “x” e “y” y h_{ix}^2 = heredabilidad individual de “x”; h_{iy}^2 = heredabilidad individual de “y”.

Estrategia de selección

Se calculó la respuesta a la selección individual (R_i), al convertir el estudio de progenies en huerto semillero, con la selección del 20.0 % de 791 árboles sanos; también se calculó la respuesta dentro de familias (R_w) y la del índice que combina información del individuo y su correspondiente familia, de acuerdo a los métodos descritos por Falconer (1972). Se hizo una comparación de los métodos con base en la respuesta esperada, para decidir la estrategia de selección a seguir en el programa de mejoramiento genético. La base de datos de campo se tamizó simulando cada método, para comparar la representación de las familias en la población seleccionada, con base en los 25 árboles plantados por familia. El método con mayor respuesta y variedad de familias e individuos dentro de familias seleccionada determina el método a emplear para convertir el ensayo de progenies en un Huerto Semillero Sexual.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componentes de varianza

La varianza entre familias es significativa, pero contribuyó con alrededor de 7.0 % de la variación total, mientras que dentro de familias fue superior a 90.0%. El coeficiente de variación aditiva y fenotípica incrementó con la edad en todas las características, pero fue mayor en volumen (V) que para altura total (A), diámetro normal (DN) o diámetro a la base (DB), por lo que se espera mayor respuesta a la selección en V que en el resto de las variables Cuadro 3.1 y por tanto, tener mayor eficiencia al hacer selección directa sobre el volumen, a pesar de que la correlación genética con las demás características puede ser alta.

Cuadro 3.1. Componentes de varianza, coeficiente de variación aditiva y fenotípica y promedio de las características evaluadas a nivel individual de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Variable	σ^2_f	σ^2_e	σ^2_A	σ^2_P	CVA (%)	CVP (%)	Promedio
A4	0.3562	6.1443	1.0686	6.5005	4.88	12.03	21.2
A5	0.4935	7.2036	1.4805	7.6971	5.20	11.86	23.4
A6	0.7536	11.4837	2.2608	12.2373	5.92	13.78	25.4
DN4	0.6188	7.5429	1.8564	8.1617	7.88	16.51	17.3
DN5	0.7023	9.7694	2.1069	10.4717	7.85	17.49	18.5
DN6	1.0136	12.5451	3.0408	13.5587	8.81	18.60	19.8
DB4	0.7841	9.5937	2.3523	10.3778	7.83	16.43	19.6
DB5	0.9971	12.6374	2.9913	13.6345	8.20	17.50	21.1
DB6	1.2433	15.7812	3.7299	17.0245	8.74	18.67	22.1
V4	546.67	5968.48	1640.01	6515.15	17.91	35.70	226.1
V5	886.87	11391	2660.61	12277.87	17.93	38.51	287.7
V6	1909.88	22473	5729.64	24382.88	21.01	43.35	360.2

Heredabilidad de las características de crecimiento

La heredabilidad individual fue en promedio de 0.18 en altura, 0.22 en diámetro normal, 0.22 en DB y 0.23 en volumen, sin observar una tendencia con la edad, excepto que en volumen hubo disminución de 0.25 a 0.23 y en altura, aumentó de 0.16 a 0.18 (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Heredabilidad individual, medias de familias y dentro de familias y error estándar (EE), para características de crecimiento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Variable	h^2_i	EE	h^2_{mf}	EE	h^2_w	EE
A4	0.16	0.08	0.48	0.23	0.12	0.06
DN4	0.23	0.09	0.56	0.22	0.16	0.07
DB4	0.23	0.09	0.56	0.22	0.16	0.06
V4	0.25	0.09	0.59	0.22	0.18	0.07
A5	0.19	0.09	0.52	0.23	0.14	0.06
DN5	0.20	0.09	0.53	0.22	0.14	0.06
DB5	0.22	0.09	0.55	0.22	0.16	0.06
V5	0.22	0.09	0.55	0.22	0.16	0.06
A6	0.18	0.08	0.51	0.23	0.13	0.06
DN6	0.22	0.09	0.56	0.22	0.16	0.06
DB6	0.22	0.09	0.55	0.22	0.16	0.06
V6	0.23	0.09	0.57	0.22	0.17	0.07

Comparando entre características, el diámetro normal y a la base y el volumen presentan mayor heredabilidad individual, aun cuando todos se encuentran dentro del rango de baja heredabilidad, indicando que la fracción de la variabilidad fenotípica transmisible a la descendencia es pequeña (Molina, 1992). Los valores obtenidos son similares a los encontrados por otros autores en especies del mismo género para familias de pedigrí incompleto. Salas, Nieto, Perafán, Sánchez y Borralho (2014), encontraron para *E. globulus* mayor heredabilidad en diámetro (0.21 y 0.32) que en altura (0.14 y 0.20) a los 1 y 4 años, de la misma manera, Mora y Serra (2014) reportaron mayor valor para diámetro (0.19) que en altura (0.10), pero mayor en volumen (0.21) que en diámetro en *E. globulus* a los 15 años.

Por el contrario, Greaves, Borralho, Raymond, Evans y Whiteman (1997) observaron en familias de polinización abierta de *E. nitens*, que la altura presenta mayor heredabilidad

individual (0.44) que el diámetro (0.42) a los 7 años, aunque el volumen superó a ambas características (0.46), por su parte, Kumar, Luna, y Kumar (2010), también obtuvieron mayor heredabilidad en altura que en diámetro normal (0.48 y 0.22), aunque en este caso el alto valor obtenido se debe a que la varianza genética aditiva aumenta al trabajar con clones. Finalmente Mesén, Vásquez y Víquez (2007) obtuvieron heredabilidad individual similar entre altura y diámetro (0.29 y 0.28) en *Eucalyptus deglupta* a los 3.8 años y en *Eucalyptus grandis* (0.13 y 0.18) a los 4.4 años.

En algunos casos se observa tendencia de incremento de la heredabilidad con la edad (Harrand, 2007; Leksono, Kurinobu & Ide, 2006; Salas et al., 2014; Suontama et al., 2015; Xudong et al., 2012), pero, es posible observar lo contrario (Changrong et al., 2016) o bien, no existe tendencia definida como Xudong et al. (2012) que lo observaron en altura, indicando que esta característica es estable a través del tiempo, lo cual es una ventaja, pues se puede estar seguro de que al seleccionar los árboles de mayor altura en los primeros años, se tendrán los árboles de mayor altura en edades avanzadas. Las diferencias observadas de los resultados obtenidos, con la literatura reportada, se atribuyen a las diferencias no solo en las especies, sino a las condiciones de prueba y edades estudiadas, ya que el valor depende de la relación entre la varianza aditiva y la varianza fenotípica de la población en cuestión (Molina, 1992).

Los valores de heredabilidad de media de familias son mayores que los de la heredabilidad individual; para altura el promedio fue de 0.50, seguido por el diámetro normal y a la base con 0.55 y volumen con 0.57. Esto se debe a que la familia considera toda la varianza y el error se ajustó al número de árboles por familia (media armónica).

La heredabilidad dentro de familias es menor que la individual y de media de familias, con promedio de 0.11 en A, 0.16 en DN y de 0.17 en DB y en V. Nuevamente se observa menor heredabilidad en altura que en el resto de los parámetros, esto indica que el ambiente afecta más la altura, tanto a nivel individual, media de familia y dentro de familias, por otro lado, diámetro y volumen se transmiten a la descendencia en mayor proporción en el estudio de progenies.

Correlaciones genéticas de las características de crecimiento

La relación genética entre las características es >0.9 y es positiva (Cuadro 3.3), por lo que se infiere que al hacer selección en cualquiera de ellas se obtiene mejora en las demás variables, lo cual concuerda con el trabajo de Shijun et al. (2015), quienes obtuvieron altas correlaciones genéticas (0.96 a 1.0) para clones de eucalipto a los 3.7 años; altas correlaciones genéticas entre diámetro, altura y volumen que también fueron superiores a 0.90 en una prueba con *Eucalyptus nitens* realizada a los 7 años por Greaves et al. (1997). Mientras que Sánchez, Salazar, Vargas, López, y Jasso (2003), para cedro rojo, los valores de esta relación entre las características de crecimiento a los 5 años fueron mayores a 0.97; Harrand (2007) obtuvo valores por arriba de 0.80 para progenies de *Eucalyptus grandis*, lo cual coincide con Changrong et al. (2016) en *Eucalyptus cloeziana* a los 8.5 años aunque la relación de la altura y el diámetro con el diámetro basal fueron negativas (-0.59 ± 0.25 y -0.38 ± 0.29); de manera similar Espinoza et al. (2014) en plántulas de *Pinus radiata* obtuvieron para altura y diámetro una correlación genética alta (0.80). Mientras que valores bajos de correlación entre diámetro

y altura (0.47) fueron obtenidos por Hein et al. (2012) en *Eucalyptus urophylla* a los 14 años.

Cuadro 3.3. Correlaciones genéticas (sobre la diagonal) y fenotípicas (bajo la diagonal) para características de crecimiento, en 49 familias de polinización libre de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

	A4	A5	A6	DN4	DN5	DN6	DB4	DB5	DB6	V4	V5	V6
A4	--	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
A5	0.7	--	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
A6	0.6	0.9	--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DN4	0.6	0.7	0.7	--	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
DN5	0.6	0.7	0.8	1.0	--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DN6	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DB4	0.6	0.7	0.7	1.0	0.9	0.9	--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DB5	0.6	0.7	0.7	0.9	1.0	1.0	0.9	--	1.0	1.0	1.0	1.0
DB6	0.5	0.7	0.7	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	--	1.0	1.0	1.0
V4	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	--	1.0	1.0
V5	0.6	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	--	1.0
V6	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	--

Los resultados difieren de lo presentado por Viveros-Viveros, Sáenz-Romero y Guzmán-Reyna (2005), en plántulas de *Pinus oocarpa*, al identificar las mismas familias con alta correlación genética en altura a los 2, 5 y 6 meses, además de una correlación genética negativa entre altura y diámetro.

La correlación entre edades para cada característica tiende a mantenerse, lo cual fue visto por Greaves et al. (1997), cuya correlación del diámetro a los 4 y 7 años también fue alta (0.99); Harrant (2007), obtuvo alrededor de 0.90 para altura, diámetro y volumen,

mientras que Salas et al. (2014), encontraron para dos sitios de prueba valores de 0.36 ± 0.18 para altura, sin embargo, para el diámetro normal los valores fueron superiores a 0.90. Hodge y Devorak (2015) obtuvieron, para *Eucalyptus urophylla*, correlación genética mayor de 0.94 en volumen a los 2-3 y 2-5 años y Xudong et al. (2012) encontraron para *Eucalyptus urophylla* x *E. tereticornis* correlaciones genéticas tendientes a 1 en volumen a los 1.5, 2.5 y 4.0 años.

Aunque se obtuvieron altas correlaciones genéticas entre V y las demás variables que son más fáciles y económicas de medir, es preferible realizar la selección directa sobre V, por lo discutido respecto al coeficiente de variación aditiva. La alta correlación genética indica que al hacer selección de los mejores individuos en V, también obtenemos los mejores individuos en altura y diámetro tanto normal como a la base.

Correlaciones fenotípicas de las características de crecimiento

La relación fenotípica entre las características aumenta con la edad y es positiva demostrando que es posible hacer selección de los mejores individuos al identificar los árboles con atributos superiores. La relación es más alta entre DN5 y DN6 y éstas con el DB y V a distintas edades, a diferencia, A4 presenta los valores más bajos. Aunque DN5 y DN6 presentan los valores mayores de correlación, podría hacerse selección aceptable con base en DN4 (>0.89), identificando a su vez los mejores árboles en las demás características (Cuadro 3.3).

El comportamiento de las correlaciones fenotípicas difieren a las obtenidas por Harrand (2007), puesto que encontró valores >0.7 entre características y edades, aunque es

similar en el sentido de la relación (positivas); para cedro rojo, Sánchez et al. (2003) también reportan correlaciones fenotípicas positivas y altas.

Respuesta a la selección

La respuesta a la selección en V6 al seleccionar 20.0 % fue de 23.7 % con el método de índice de selección combinada y fue mayor en comparación a los otros métodos en 3.3 y 7.9 %, para selección individual e intrafamiliar, respectivamente (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Comparación de la respuesta a la selección en volumen a los 6 años (%) de diferentes métodos en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Carácter	Respuesta a la selección (%)		
	i=1.4		
	Individual	Intra-familiar	Índice selección combinada
V6	14.3	9.7	17.6

El método que arrojó mayor ganancia en V6 fue el índice de selección combinada, debido a que su valor se pondera a nivel familiar y dentro de familia, por lo que se aprovecha la información de los dos niveles de variación. Este método es recomendable para caracteres de baja heredabilidad (Zobel & Talbert, 1988).

Martins, Cruz, Rocha, Regazzi & Pires (2005) obtuvieron mayor respuesta a la selección con el índice Smith y Hazel con altura y circunferencia, en *E. grandis*, con valores de 52.5 y 49.4 %, respectivamente, mientras que para la selección de familias combinada con la selección dentro de familias fue 5.0% menor y al seleccionar dentro de familias la ganancia fue 31.3 % inferior al índice para circunferencia y alrededor de 30.0 % para

altura. Por su parte, Martins I., Martins R. y Pinho (2006) obtuvieron cerca del 40.0 % de respuesta en la circunferencia y altura con la selección directa probando dos índices de selección. Las discrepancias en la respuesta a la selección en comparación con la literatura se deben a que en la presente investigación se realizó el cálculo de la respuesta a la selección de una característica (V6), mientras que en los documentos citados, el índice involucra la selección de dos características, lo que involucra una selección más rigurosa. Sánchez et al. (2003) encontraron que la respuesta en volumen, al seleccionar el 20.0 % en *Cedrela odorata* a los 5 años, fue de 49.2 %, aunque esta se calculó bajo el escenario de selección masal, en este caso, la heredabilidad y varianza propia de la población influyó en la respuesta esperada.

Estructura genética de la población seleccionada

De los 1 225 árboles plantados, se identificaron 791 árboles sin presentar signos o síntomas de cancro del tallo. Aunque la selección se realizó sobre los árboles sanos, los porcentajes de individuos seleccionados se graficaron sobre los 25 árboles plantados. Las familias seleccionadas por cada método, por la característica de mayor heredabilidad (V6) y la selección del 20.0 %, reflejaron que la selección individual concentra 16.3 % más familias que el índice combinado, aunque el número de individuos dentro de éstas es menor en general.

Al simular la selección individual, el número y tamaño de familia es mayor para el AS01 con todas las familias representadas, seguido por el AS02 con una familia no representada (la familia 18), PLUS y ARG con dos familias no representadas (28 y 29;

40 y 47, respectivamente) y alrededor de 25.0 % de familias con menos de tres árboles en cada fuente, excepto para ARG con 46.3 % de las familias del tamaño mencionado. La selección por índice combinado representa menor número de familias. El número de familias no representadas difieren entre fuentes de semilla: AS02 con 2 (18 y 22); AS01 con 3 (4, 5, 12), PLUS con 4 (26, 28, 29 y 33) y ARG con 6 (38, 39, 40, 43, 47 y 48). El 25.0 a 33.3 % de familias de AS02, AS01 y PLUS con menos de 3 árboles (25% del número de familias), mientras que para ARG el 46.2 % de las familias serían de tamaño pequeño. De la fuente AS02 el 25 % de las familias (17, 14 y 16) resultarían con más de 12 individuos selectos (Figuras 3.1-3.4).

La selección intrafamiliar permite la selección del 100 % de familias, pero el tamaño, aunque más uniforme en comparación a los otros métodos, es pequeño. Aunque la respuesta esperada es menor, puede preservarse como un reservorio de genes para posteriores ciclos de mejoramiento genético.

Los resultados obtenidos en cuanto la respuesta a la selección y la estructura genética de la población de cada método, indican que la selección por índice de selección combinada es la mejor opción para convertir el ensayo de progenies en huerto semillero sexual, ya que se aprovecha la información a nivel familia e individuo (Falconer, 1972). Aunque la selección dentro de familias induciría una menor tasa de endogamia en la progenie del huerto, tal como como lo indican Zobel y Talbert (1988), la diferencia en la respuesta esperada es definitiva.

Debido a que en cada familia sobrevivió un número diferente de individuos, las fuentes AS01, AS02, PLUS y ARG aportarán 42, 66, 31 y 19 árboles, respectivamente, para un total de 158 árboles.

Al graficar el porcentaje de árboles selectos por familia, con respecto a los 25 plantados por cada una, además, se muestra el porcentaje de árboles enfermos (incidencia) por familia a los 6 años de evaluación para cada fuente de semilla, cabe mencionar que algunos individuos murieron, pero, se debió a otras cuestiones y no a la enfermedad (Figuras 3.1 a 3.4).

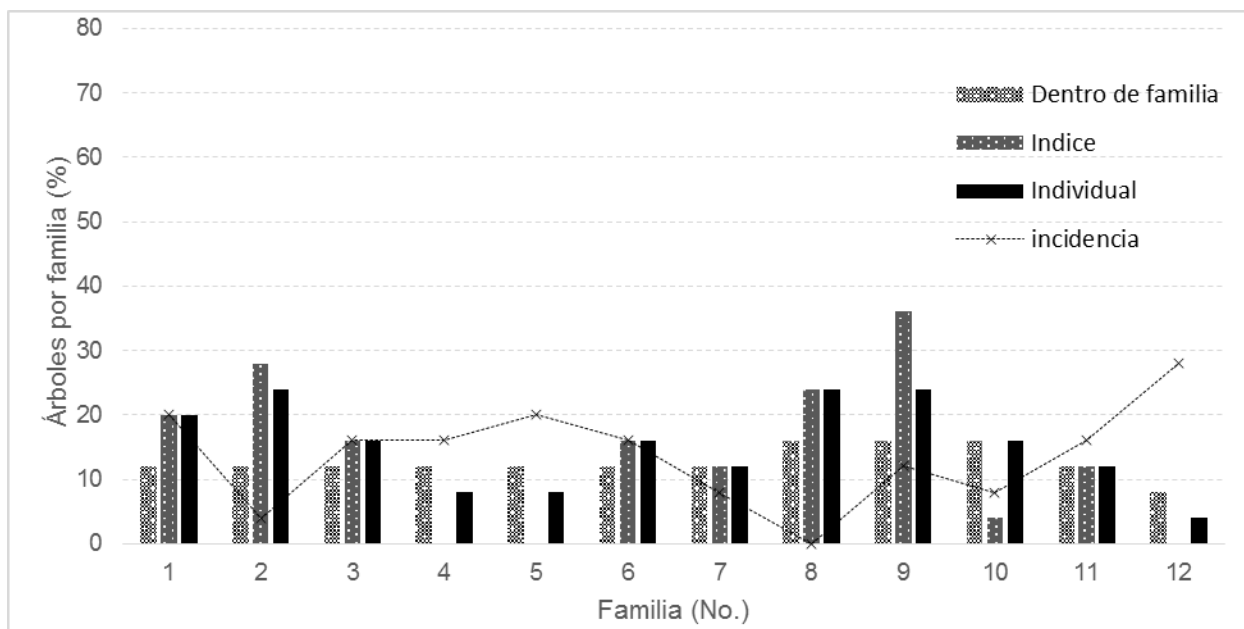


Figura 3.1. Comparación de la representación de familias del área semillera 01 (AS01) entre métodos de selección. N= 25.

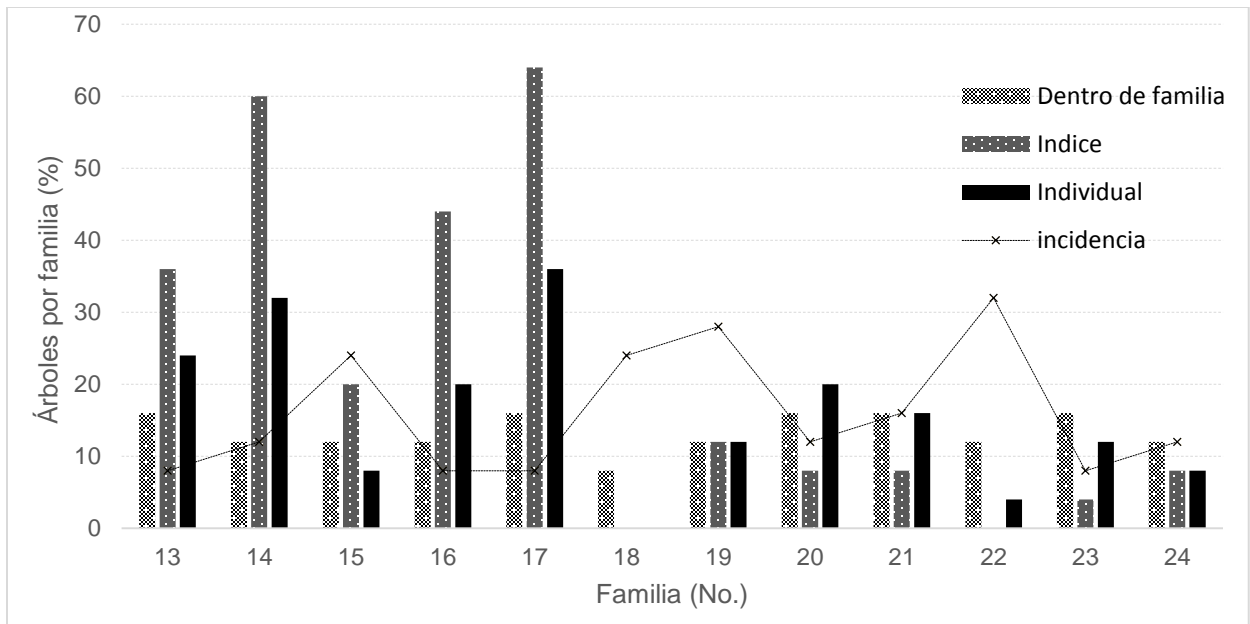


Figura 3.2. Comparación de la representación de familias del área semillera 02 (AS02) entre métodos de selección. N= 25.

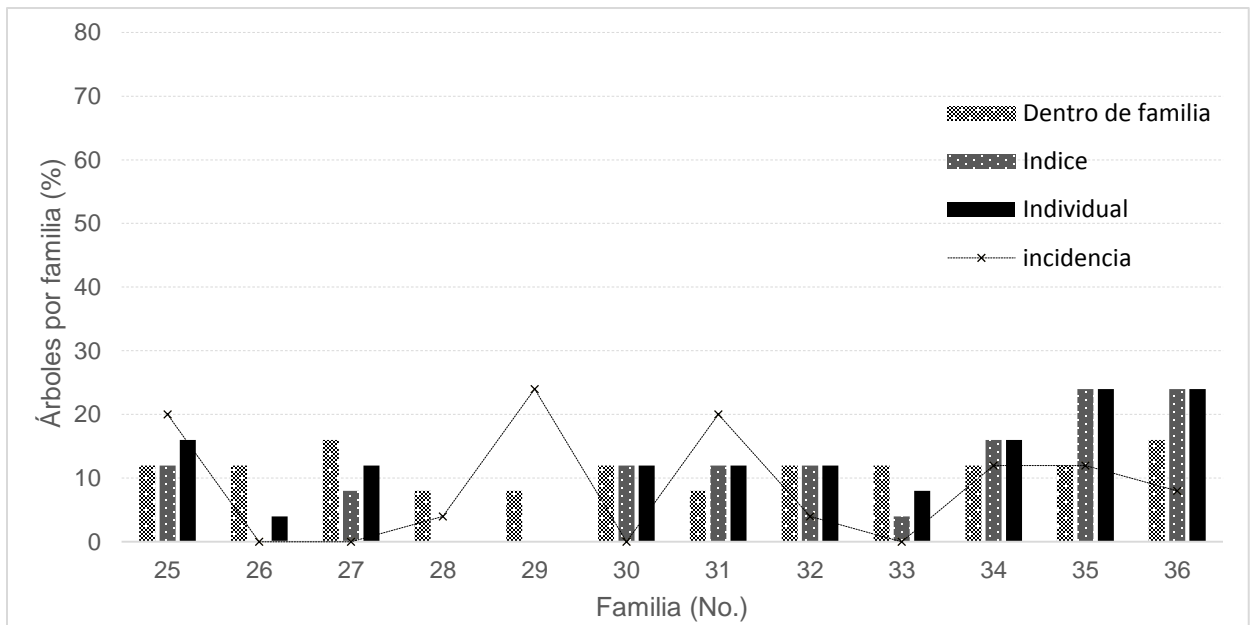


Figura 3.3. Comparación de la representación de familias de los árboles plus (PLUS) entre métodos de selección. N= 25.

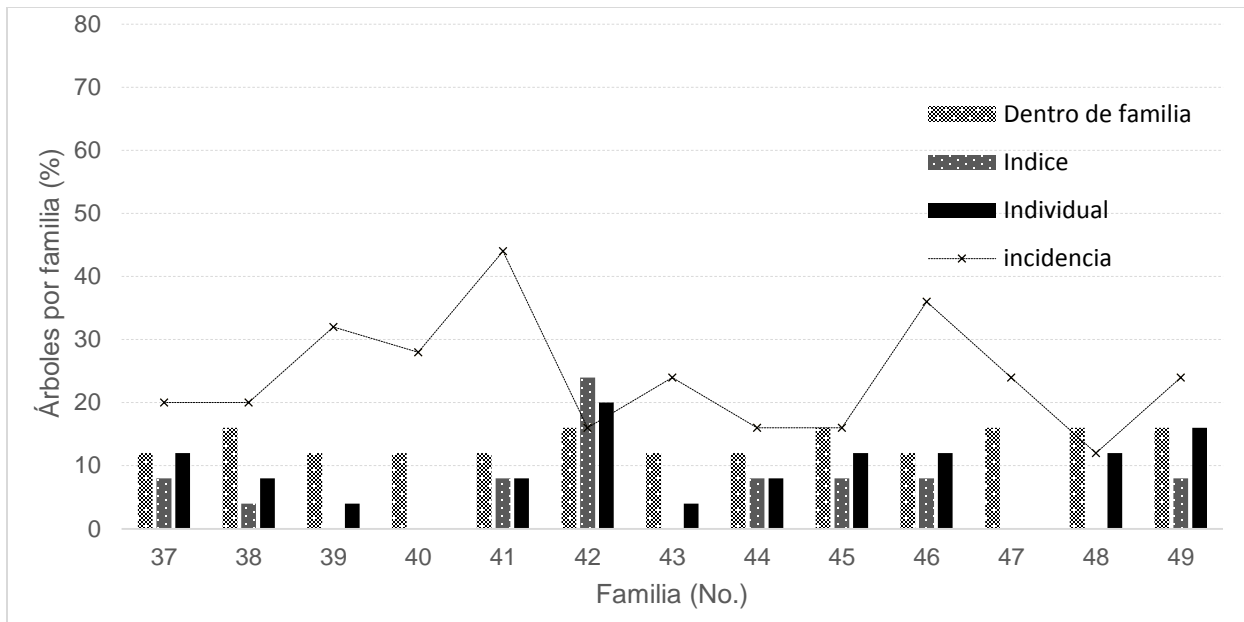


Figura 3.4. Comparación de la representación de familias de los árboles de Argentina (ARG) entre métodos de selección. N= 25.

La fuente AS01 en el ensayo presentó incidencia del cancro del 13.7 %, mientras que en AS02 fue 16.0 %, en la fuente plus 8.7 % y en Argentina 24.0 %.

A nivel de familias dentro de cada fuente, el porcentaje de árboles con la enfermedad es 30.0 % o menos en AS01 y AS02, aunque en ésta última una familia presentó mayor incidencia (Figuras 3.1 y 3.2); para la fuente Plus 3 familias no mostraron singos o síntoma de cancro, y en la familia con mayor número de árboles enfermos, la incidencia fue de 20.0 %; mientras, para la fuente Argentina incidencia fue 12.0 y 44.0 %.

En general, la selección realizada para el establecimiento del ensayo de progenies tuvo un buen resultado para la reducción de la enfermedad, ya que en el área semillera 1 hubo una incidencia de 60.2 %, y 65.2 % en el área semillera 2. Esto también sugiere que existe variación en la resistencia al cancro dentro de la especie como lo observaron Van Heerden, Amerson, Preisig, Wingfield y Wingfield (2005).

Con estos resultados se dedujo que la mejor fuente en volumen fue la AS02, por el número de individuos seleccionados con el índice combinado, seguida de AS01 y PLUS, pero, en cuanto a incidencia de cancro, PLUS fue de mejor calidad que AS01 y AS02. Curiosamente ARG fue de menor calidad tanto en volumen como en sanidad.

3.6. CONCLUSIONES

Las heredabilidades individuales de las características de crecimiento fueron bajas, sin embargo, sus valores coinciden con los reportes para esta especie, tanto a nivel individual como de media de familias.

Se obtuvieron heredabilidades bajas, pero similares para volumen, diámetro normal y a la base, y menor en altura, para la edad de 4, 5 y 6 años, lo que indica que el ambiente tiene mayor influencia en la altura del árbol, en el ensayo de progenies.

Las altas correlaciones genéticas y fenotípicas indican que al seleccionar árboles por volumen a los 6 años, característica de mayor heredabilidad, también se obtiene mejora en las demás características.

Se obtuvo buena respuesta relativa esperada y aceptable variación en la base genética para V6, con la selección del 20.0 % de los árboles sanos con el método de índice de selección combinada. La población seleccionada con el índice combinado es la mejor para obtener semilla (Huerto Semillero) para abastecer los programas de plantación y con la cual también puede establecerse una prueba de familias F₂, para dar continuidad al mejoramiento genético de esta especie en Oaxaca.

Aunque la selección dentro de familias generó menor respuesta esperada en comparación al índice combinado, ofreció mayor variación en la base genética, por tanto, esta podría conservarse como reservorio para futuros ciclos de mejoramiento.

ANEXO A

Número de árboles sobrevivientes en el estudio de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden a los 6 años por fuente y familia

Fuente	Familia	No. árboles sobrevivientes	No. de árboles sanos	Fuente	Familia	Árboles sobrevivientes	No. de árboles sanos
AS01	1	20	16	PLUS	26	13	13
AS01	2	18	17	PLUS	27	18	18
AS01	3	17	13	PLUS	28	14	13
AS01	4	20	16	PLUS	29	11	10
AS01	5	16	14	PLUS	30	14	14
AS01	6	21	17	PLUS	31	13	11
AS01	7	18	16	PLUS	32	18	17
AS01	8	20	20	PLUS	33	15	15
AS01	9	21	19	PLUS	34	16	14
AS01	10	20	18	PLUS	35	19	17
AS01	11	21	17	PLUS	36	23	22
AS01	12	14	12	ARG	37	21	16
AS02	13	23	21	ARG	38	23	20
AS02	14	19	17	ARG	39	20	13
AS02	15	20	15	ARG	40	18	13
AS02	16	16	15	ARG	41	22	13
AS02	17	20	19	ARG	42	23	19
AS02	18	16	12	ARG	43	21	16
AS02	19	23	17	ARG	44	21	16
AS02	20	20	18	ARG	45	24	20
AS02	21	21	18	ARG	46	19	13
AS02	22	20	14	ARG	47	22	18
AS02	23	21	19	ARG	48	22	19
AS02	24	19	16	ARG	49	24	19
PLUS	25	20	16				

ANEXO B

Base genética de la población seleccionada (20.0%) por cada método de selección en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Fuente	Familia	Método de selección			Fuente	Familia	Método de selección		
		Intrafamiliar	Índice comb.	individual			Intrafamiliar	Índice comb.	individual
1	1	3	5	5	3	25	3	3	4
	2	3	7	6		26	3	0	1
	3	3	4	4		27	4	2	3
	4	3	0	2		28	2	0	0
	5	3	0	2		29	2	0	0
	6	3	4	4		30	3	3	3
	7	3	3	3		31	2	3	3
	8	4	6	6		32	3	3	3
	9	4	9	6		33	3	1	2
	10	4	1	4		34	3	4	4
	11	3	3	3		35	3	6	6
	12	2	0	1		36	4	6	6
2	13	4	9	6	4	37	3	2	3
	14	3	15	8		38	4	1	2
	15	3	5	2		39	3	0	1
	16	3	11	5		40	3	0	0
	17	4	16	9		41	3	2	2
	18	2	0	0		42	4	6	5
	19	3	3	3		43	3	0	1
	20	4	2	5		44	3	2	2
	21	4	2	4		45	4	2	3
	22	3	0	1		46	3	2	3
	23	4	1	3		47	4	0	0
	24	3	2	2		48	4	0	3
					49	4	2	4	

Nota: El 20.0 % de la población total (791 árboles sanos) está constituido por 158 árboles

3.7 LITERATURA CITADA

- Changrong, L., Qijie, W., Jian-Bo, C., Mei, L., Changpin, Z., Shengkan, C., Wei, Z., Dongqiang, G., Cuixiang, L., Jian-Cheng, C., Dongyun, X. & Siming, G. (2016). Genetic parameters for growth and wood chemical properties in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. *New Forests*, 1-17. doi:10.1007/s11056-016-9554-4
- Dickerson, G. E. (1969). Techniques for research in quantitative animal genetics. In: A B Chapman (Ed.) *Techniques and Procedures in Animal Science Research*. (pp: 36-79). New York: American Society of Animal Research, Albany.
- Espinoza, S. E., Martínez, V. A., Magni, C. R., Ivković, M., Santelices, R. E., Guerra, F. P. & Cabrera, A. M. (2014). Genetic control of growth, biomass allocation and survival under drought stress in *Pinus radiata* D. Don seedlings. *Tree Genetics & Genome*, 10:1045-1054. doi:10.1007/s11295-014-0741-1
- Falconer, D. S. & T. F. C. Mackay. (1996). *Introduction to Quantitative Genetics*. Edinburgh: Addison Wesley Longman Limited.
- Falconer, D. S. (1972). *Introducción a la genética cuantitativa*. México, D. F.: Continental
- Galán, L. R., De los Santos, P. H. M. & Valdez, H. J. I. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalpa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y bosques*, 12(2), 65–82. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/>
- Greaves, B. L., Borralho, N. M. G., Raymond, C. A., Evans, R. & Whiteman, PH. (1997). Age-age correlation in, and relationships between basic density and growth in

Eucalyptus nitens. *Silvae genetica*, 46(5):264-270. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/40740909>

Harrand, L. (2007). *Parámetros genéticos en características de crecimiento y densidad de la madera en progenies de Eucalyptus grandis*. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Hein, P. G. G., Bouvet, J. M., Mandrou, E., Vigneron, P., Clair, B. & Chaix, G. (2012). Age trends of microfibril angle inheritance and their genetic and environmental correlations with growth, density and chemical properties in *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. *Annals of Forest Science*, 69:681-691. doi:10.1007/s13595-012-0186-3

Hodge, G. R. & Devorak, W. S. (2015). Provenance variation and within-provenance genetic parameters in *Eucalyptus urophylla* across 125 tests sites in Brazil, Colombia, México, South Africa y Venezuela. *Tree Genetics & Genomes*, 11:57. doi:10.1007/s11295-015-0889-3

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Mapa digital de México V6.1. Climas (1921-1975). 20-12-2016 en <http://gaia.inegi.org.mx/>

Kumar, A., Luna, R. K. & Kumar, V. (2010). Variability in growth characteristics for different genotypes of *Eucalyptus tereticornis* (SM.). *Journal of Forestry Research*, 21(4):487-491. doi:10.1007/s11676-010-0103-2

Leksono, B., Kurinobu, S. & Ide, Y. (2006). Optimum age for selection based on a time trend of genetic parameters related to diameter growth in seedling seed orchards of *Eucalyptus pellita* in Indonesia. *Journal of Forestry Research*, 11:359-364. doi:10.1007/s10310-006-0223-x

- Martins, I. S., Cruz, C. D., Regazzi, A. J., & Pires, I. E. (2003). Eficiência da seleção univariada direta e indireta e de índices de seleção em *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 27(3), 327-333. Obtenido de <http://www.scielo.br/pdf/%0D/rarv/v27n3/a08v27n3.pdf>.
- Martins, I. S., Cruz, C. D., Rocha, M. D. G. D. B., Regazzi, A. J. & Pires, I. E. (2005). Comparação entre os processos de seleção entre e dentro e o de seleção combinada, em progênies de *Eucalyptus grandis*. *Cerne*, 11(1): 16-24. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74411102>.
- Martins, I. S., Martins, R. D. C. C., & Pinho, D. D. S. (2006). Alternativas de índices de seleção em uma população de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Cerne*, 12(3): 287-291. Obtenido de <http://www.sifloresta.ufv.br/handle/123456789/18086>.
- Mesén, F., Vásquez, W. & Víquez, E. (2007). Ensayos de familias F₂ de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* con fines de conversión en huertos semilleros. *Agronomía Costarricense*, 31(2), 9–20. Obtenido de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6794>.
- Molina, D. J. D. (1992). *Introducción a la genética de poblaciones y cuantitativa*. México, D. F.: AGT
- Mora, F. & Serra, N. (2014). Bayesian estimation of genetic parameters for growth, stem straightness, and survival in *Eucalyptus globulus* on an Andean foothill site. *Tree genetics & genome*, 10:711-719. doi:10.1007/s11295-014-0716-2
- Oros, N. D. (2008). *Diversidad vegetal en el sotobosque de plantaciones forestales comerciales de Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Paredes-Díaz, E., Jasso-Mata, J., López-Upton, J. & Alvarado-Rosales, D. (2010). Presencia de *Chrysosporthe cubensis* (Bruner) Gryzenhout & M. J. Wingf. en plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2): 81–92. Obtenido de <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/153/144>.
- Salas, M., Nieto, V., Perafán, L. Sánchez, A. & Borralho, N. M. G. (2014). Genetic parameters and comparison between native and local landraces of *Eucalyptus globulus* Labill. ssp. *globulus* growing in the central highlands of Colombia. *Annals of Forest Science*, 71:405-414. doi: 10.1007/s13595-013-0342-4
- Sánchez, M. V., Salazar, G. G., Vargas, H. J. J., López, U. J. & Jasso, M. J. (2003). Parámetros genéticos y respuesta a la selección en características del crecimiento de *Cederla odorata* L. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(1):19-27. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61026103>
- SAS Institute. (2002). The SAS system for Windows. Release. SAS Institute, Cary, N.C.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2015). Normales climatológicas. Normales 1951-2010. 20-12-2016 en <http://smn.cna.gob.mx/>
- Shijun, W., Zhaohuan, L., Jianmin, X., Guangchao, C., Yingan, Z. & Guangyou, L. (2015). Genetic variation in growth traits and stem-branch characteristics and their relationships to *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 26(4):957-962. doi:10.1007/s11676-015-0092-2
- Suontama, M., Low, C. B., Stovold, G. T., Miller, M. A., Fleet, K. R., Li, Y. & Dungey, H. S. (2015). Genetic parameters and genetic gains across three breeding cycles for

- growth and form traits of *Eucalyptus regans* in New Zealand. *Tree Genetics & Genomes*, 11:133. doi: 10.1007/s11295-015-0957-8
- Van Heerden, S. W., H. V. Amerson, O. Preisig, B.D. Winfield & M.J. Winfield. (2005). Relative pathogenicity of *Cryphonectria cubensis* on Eucalyptus clones differing in their resistance to *C. cubensis*. *Plant Disease*, 89(6): 659-662. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1094/PD-89-0659>
- Vargas, H. J. J., Jasso M. J. & Bermejo, V. B. (2004). El mejoramiento genético forestal como base para el establecimiento de plantaciones forestales. In B. Arteaga M. & M. A. Musalem S. (Eds.), *Plantaciones forestales* (pp. 49-80). Chapingo, México: UACH.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C. & Guzmán-Reyna, R. R. (2005). Control genético de características de crecimiento en vivero en plántulas de *Pinus oocarpa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(4):333-338. Obtenido de <https://www.researchgate.net>
- White, T. L. & Hodge, G. R. (1989). *Predicting breeding values with applications in forest tree improvement*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Xudong, H., Fagen, L., Mei, L., Qijie, W., Jisen, S., Xiaoyong, M. & Siming, G. (2012). Quantitative genetics of cold hardiness and growth in *Eucalyptus* as estimates from *Eucalyptus urophylla* x *E. tereticornis* hybrids. *New Forest*, 43:383-394. doi: 10.1007/s11056-011-9287-3
- Zobel, B. & Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México, D. F.: Limusa.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

La fuente plus presentó mayor número de familias con buen crecimiento y menor incidencia de cancro, por el contrario, la fuente argentina, aunque también tuvo familias con buen crecimiento, tiende a presentar mayor incidencia de cancro.

Las familias con mayor crecimiento en por lo menos dos características, también presentaron menor incidencia de cancro, esto, además de la variación encontrada en las características de crecimiento, sugiere que es posible dar continuidad con el mejoramiento genético de la especie, por lo que es menester establecer una prueba de familias F_2 , a pesar de la baja heredabilidad de dichas características, sobre todo, para reducir la incidencia de la enfermedad.

El índice altura-forma indica que la descendencia de las áreas semilleras es buena para más de la mitad de las familias, seguido por la fuente plus, con casi la mitad, sin embargo, para Argentina solo en dos familias se obtuvo valor positivo de este indicador.

A pesar de lo mencionado anteriormente respecto a la fuente Argentina, no se le debe restar importancia, ya que es reservorio de genes útiles para posteriores ciclos de mejoramiento, sobre todos con la selección de los individuos sanos de mayor crecimiento y menor incidencia de la enfermedad.

Establecer el huerto semillero con la semilla de los mejores genotipos identificados con la selección del índice combinado ofrece mayor respuesta a la selección, que con la selección dentro de familias.

Las características anatómicas de las fibras e índices de calidad de pulpa estimados, reflejaron que la calidad de la pulpa es satisfactoria para la producción de pulpa para papel.

La densidad de la madera refleja que son árboles con madera juvenil.

Finalmente, de todas las familias seleccionadas por su crecimiento, solo las familias 27, 31, 33, 38 y 42 coinciden con lo obtenido por el índice de selección combinado en volumen.

El ensayo de progenies deberá ser aclarado genéticamente para convertirlo en huerto semillero, dejando en pie solo los individuos que se señalan en el Anexo C de este documento, previa revisión y confirmación fenotípica en campo.