

Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X

Wood Density in *Eucalyptus* clones by X-Rays Densitometry

Bibiana Arango*, Lida Tamayo

Grupo de Investigación en Política y Gestión Tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana, Dirección Postal CO 0701, Medellín, Colombia.

(Recibido el 16 de julio de 2007 Aceptado el 9 de mayo de 2008)

Resumen

En el Brasil y en diversos países se han verificado avances significativos en la silvicultura clonal intensiva con diferencias marcadas entre clones de especies e híbridos de *Eucalyptus* en lo referente a los parámetros de crecimiento y desarrollo. Al mismo tiempo, en los últimos años, se introdujo el concepto de uso múltiple del leño de los árboles con la utilización de la madera como fuente de celulosa y papel, madera sólida y otras aplicaciones como estrategia de aumento de la rentabilidad del emprendimiento forestal. El presente trabajo tuvo como objetivo determinar el índice de uniformidad de la madera y la variación de la densidad en el sentido radial por densitometría de rayos X de árboles de 8 años de edad de clones de *Eucalyptus grandis* y *E. grandis x urophylla*, buscando posibilitar la optimización de su uso.

Por sus características silviculturales se seleccionaron los 5 mejores clones de la especie e híbrido de las plantaciones clonales localizadas en el municipio de San Miguel de Arango-SP de la Cia Suzano de Celulosa y Papel. Se caracterizaron 3 modelos de variación radial de la densidad y la formación de 3 tipos de madera (juvenil, de transición y adulta); el valor medio de densidad aparente de la madera en los clones fue de 0,46 y 0,54 g/cm³, para el *Eucalyptus grandis* y *E. grandis x urophylla*, respectivamente.

----- **Palabras clave:** *Eucalyptus*, Rayos X, Densitometría, Clones, Densidad.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 415 90 91 ext 9893, fax + 57 + 4 415 90 83, correo electrónico: bibiana.arango@upb.edu.co (B. Arango)

Abstract

In Brazil, as in many other countries significant advances have been verified in intensive clonal silviculture with remarkable differences on parameters of growth and development between species clones and hybrids of *Eucalyptus*. At the same time, during recent years the concept of multiple uses of tree logs to increase the yield of the forest enterprise as cellulose and paper and solid wood has been introduced. The present paper studies the wood uniformity index and radial variability of density using x-rays densitometry of 8 year clones *Eucalyptus grandis* and *E. grandis x urophylla* in order to optimize their use. This experiment was performed at Suzano Cellulose and Paper Company Clone Plantation in San Miguel de Arcanjo-SP-Brazil. The best five clones of the species and hybrid by their silviculture characteristics were selected. Three models of radial density variation were found and the formation of three different types of wood were characterized (youthful, of transition and adult); the average value of wood apparent density in clones was 0.46 and 0.54 g/cm³ for *Eucalyptus grandis* and *E. grandis x urophylla*, respectively.

----- *Keywords: Eucalyptus, X-rays, densitometry, density, clon.*

Introducción

La innovación constituye un importante factor de crecimiento económico para los países. Sin embargo, la innovación no se produce en forma aislada, requiere la participación de diferentes actores quienes colaboran sobre un problema específico, localizado y para quienes el conocimiento deber ser útil. Desde hace más de 10 años la comunidad académica, profesional y práctica está enviando señales a través de publicaciones especializadas y masivas que afirman que la innovación se nutre y fortalece a través de las dinámicas de acción conjunta para lograr desplegar y galvanizar resultados fruto de la eficiencia colectiva [1]. La comunidad científica desempeña un papel clave en la aplicación de un conocimiento particular a un problema específico y en la transformación de los resultados de la investigación científica, de forma que ellos puedan ser utilizables en el ambiente industrial. En esta investigación se determinó el índice de uniformidad de la madera y la variación de la densidad en el sentido radial por densitometría de rayos X de árboles de 8 años de edad de clones de *Eucalyptus grandis* y *E. grandis x urophylla*, buscando posibilitar la optimización de su uso, que por lo general, se expresa en un incremento de productividad para el sector forestal. Trabajos anteriores realizados sobre el tema en Brasil y en diversos países, han verificado significativos avances en la silvicultura clonal intensiva con diferencias marcadas existentes entre clones de especies e híbridos de *Eucalyptus* en lo referente a los parámetros de crecimiento y de desarrollo. Conforme se destacó anteriormente, este trabajo permite concluir que la obtención de los índices de uniformidad de la madera proporcionan la inclusión de un nuevo parámetro de calidad de la madera en los programas de mejoramiento forestal y de tecnología y utilización de la madera de *Eucalyptus*.

Densidad de la madera por el método de densitometría de rayos X

La técnica de densitometría de rayos X consiste en la obtención de radiografías de una fina sección transversal de madera sobre un filme radiográfico.

En el filme expuesto a la fuente de rayos X y por el paso de la radiación a través de la muestra de madera se forma una imagen de su estructura transversal [2]. Oliveira [3] afirmó que la técnica permite medir las variaciones de la densidad de la madera a pequeñas distancias, imposible por el método gravimétrico convencional, obteniendo gráficos del patrón de variación radial de la densidad y proporcionando la evaluación del desarrollo de árboles de especies diferentes, y la selección de las que producen madera con densidad más uniforme o más elevada. Dicho autor también observó que para árboles con diámetro de 28 cm, la madera juvenil corresponde a cerca de 18 cm, con incremento de 50% en el valor de la densidad en la madera adulta [4]. Según Silva [5], existe gran influencia del espaciamiento entre árboles en la densidad de la madera, con el grado de supresión mostrando pronunciado efecto inverso en la uniformidad de la madera. Los espaciamientos entre árboles más estrechos inducen al rápido aumento de la densidad de la madera a partir de la médula y en los más anchos el patrón de densidad es más uniforme y con mayor cantidad de madera adulta en árboles de edades más precoces. La densidad aparente de la madera en el género *Eucalyptus* varía de 0,40 a 1,20 g/cm³ siendo clasificada como leve, media y pesada [4]. Silva [6] al utilizar la densitometría de rayos X en maderas de árboles de *E. grandis*, con cuatro diferentes edades, confirma el aumento del crecimiento de la densidad aparente de la madera en el sentido médula-corteza. Para los árboles con diez años de edad, la densidad aparente media fue de 0,46 g/cm³, siendo 50% de la sección radial próxima a la médula formada por madera juvenil; a los veinte y cinco años la densidad aparente media fue de 0,63 g/cm³, detectando la madera juvenil mas próxima de la médula.

Silvicultura clonal intensiva

Según Silva [5], la propagación clonal tiene como meta principal la reproducción de individuos genéticamente idénticos, de material vegetativo procedente de una planta seleccionada. En 1974 se inició en Brasil el desarrollo de métodos de

propagación vegetativa a partir de estacas colectadas de brotaciones de cepas de eucalipto, con la primera plantación clonal establecida en 1979 de mil hectáreas en el Estado de Espírito Santo, con aumentos significativos en productividad y calidad de la madera [7].

La clonación es muy útil en la consolidación de aumentos del mejoramiento genético e hibridación, promoviendo la homogenización de las propiedades tecnológicas de la madera, con beneficios para la calidad del producto final, altamente deseable en la actividad industrial [8]. Los trabajos desarrollados con mejoramiento forestal en las dos últimas décadas elevaron el nivel productivo y cualitativo de los bosques comerciales y según Ferreira [9] la nueva silvicultura clonal intensiva procura mejorar la adaptación de las especies/procedencias y establece bases genéticas más sólidas. Pires et. al [10] afirmaron que un programa de mejoramiento genético eficiente, debe considerar las características de la madera que afectan la calidad del producto final que son posibles de manipulación genética, debiendo considerar también el muestreo, el método de análisis de datos y la interpretación de los resultados. Resende et. al [11] afirmaron que la diversidad genética entre especies, procedencias dentro de especies y la manifestación de heterosis en algunas características ha incentivado los programas de hibridación en el género *Eucalyptus*. La silvicultura clonal se basa en la selección de árboles superiores en poblaciones de especies/procedencias y en las técnicas de reproducción asexual, utilizando la variación genética existente, con los beneficios genéticos sucesivos, propiciando mayor producción de madera de calidad, en menor tiempo por unidad de área [9]. En este contexto Ruy [7], argumentó que estudios de métodos de selección, como la variabilidad natural y la adecuación al uso de la madera, son fundamentales en la silvicultura clonal intensiva. Actualmente, el mejoramiento genético forestal selecciona como genotipos superiores, los individuos con excelentes características silviculturales y tecnológicas (densidad básica, contenido de lignina y de extractivos, rendimiento y características de

la celulosa). En Brasil, varias compañías tienen proyectos forestales utilizando la silvicultura clonal instalados como base de expansión de la industria de celulosa y papel en los estados de Sao Paulo, Bahía, Maranhao, Amapá, etc. Los excelentes resultados obtenidos con el híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* propagado clonalmente vienen siendo la principal justificación en China, Venezuela, África del Sur e Indonesia para introducir la silvicultura clonal en sus programas de abastecimiento de madera para las industrias [9]. Según Campinhos et. al [12] en la producción de “super híbridos” de madera para celulosa, se seleccionan árboles de *E. grandis* y *E. urophylla* con excepcionales calidades fenotípicas, genotípicas (volumen, plasticidad para sitios, calidad de la madera, rendimiento de pulpa y calidad de fibra) y cruzadas para su propagación vegetativa. Simultáneamente se instalan los bancos de semillas para producción de híbridos por polinización abierta combinando los clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, y *E. grandis* x *E. pellita* para producir semillas híbridas que satisfagan las exigencias de las áreas forestales e industriales (volumen, resistencia a enfermedades, adaptación al medio ambiente y calidad de la madera para producción de pulpa blanqueada). Griffin et. al [13] citan que en 1991 cerca de veinte empresas brasileras operaban los programas de plantaciones clonales, con sesenta y cinco por ciento de la producción de madera, de las veinte y cinco mayores empresas, de especies de eucalipto y, de estos, veinte y nueve por ciento oriundos de estacas enraizadas.

Materiales y métodos

Caracterización del sitio y del experimento

El experimento se realizó en la Hacienda Santa Rosa, en el municipio de San Miguel Arcaño-SP, de propiedad de la Cia Suzano de Celulosa y Papel en agosto de 1992. El área experimental se encuentra en una longitud de 47° 98' W, latitud de 23° 88' S y altitud de 660 m. La precipitación media anual es de 1,174 mm, temperatura media anual de 18-19 °C, siendo diciembre y enero los

meses más lluviosos y julio y agosto los más secos. Las temperaturas más elevadas ocurren de diciembre a marzo y las más bajas de junio a julio, con posibilidad de heladas. El experimento ocupó un área de 1,47 ha, con un espaciamiento de 2,70 x 2,23 m y aplicación de 140 g de NPK (6-30-6) y 200 g de FAPS/planta.

Especies e híbrido

Se utilizaron clones de *Eucalyptus grandis* y *E. grandis* x *urophylla*. Los clones de *E. grandis* se seleccionaron de plantaciones establecidas con semillas procedentes del banco de semillas del huerto de Río Claro-SP, los de *E. grandis* x *urophylla* de semillas provenientes de la compañía Aracruz de Celulosa, plantadas en el municipio de Biritiba Mirim-SP, de la compañía Suzano de Celulosa y Papel.

Selección de los clones

El experimento constó de diferentes números de clones para la especie e híbrido de eucaliptos, siendo 37 clones *E. grandis* y 27 *E. grandis* x *urophylla* en ensayo instalado con delineamiento de 5 bloques con 6 árboles/clon/repetición. Del total de clones de la especie e híbrido de eucaliptos se seleccionaron los 5 mejores, con base en el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y de copa, rectitud del tallo, etc. Luego, para cada clon se seleccionaron los 3 mejores árboles, siendo 15 árboles de *E. grandis* y de *E. grandis* x *urophylla*, para un total de 30 árboles muestreados.

Recolección de las muestras del leño

Los árboles de los clones seleccionados se cortaron, desramaron y se retiraron los cilindros de leño (3,5-4,5 cm de espesor) en el diámetro a la altura del pecho (DAP) del tronco, se identificaron con un código numérico (clon, bloque, repetición y porcentaje de altura) y se transportaron al Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas del Departamento de Ciencias Forestales – ESALQ/USP.

Preparación de las muestras del leño

Las superficies transversales de las 30 muestras de leño se pulieron en una serie de lijas para la visualización de las regiones de corteza, albura y duramen, anillos de crecimiento, segmentos de ramas (nudos internos), rajaduras, pudrición, etc.

Variación radial de la densidad de la madera por densitometría de rayos X

Para cada clon se seleccionaron 3 árboles y de estos, las muestras del leño del DAP (total 30 muestras), en las cuales se delinearon, identificaron y cortaron submuestras diametrales (20x10 mm, largo x ancho) libres de defectos. Esas submuestras del leño se fijaron en un soporte de madera y se cortaron en secciones transversales (1,0 mm, 25 espesor), con aparato de doble sierra circular. Estas secciones del leño se acondicionaron (12 h, 20 °C, 50% HR) para conseguir 12% de humedad y en seguida se colocaron sobre filmes de rayos X (Kodak, Diagnostic Film X-Omat XK1, 240x180 mm) en equipos de rayos X (Hewlett Packard, Faxitron 43805 N) y radiografiados (1,20 m fuente de rayos X-filme; 5 min, 16 Kv, 3 mA). La revelación de los filmes radiográficos de las muestras de leño se analizaron en microdensitómetro (Joyce Loebel MK III-C; 0,1 x 0,3 mm ventana de lectura; 10 cm/min cobertura). Los valores puntuales de densidad óptica del leño se transformaron en densidad aparente a través de un software específico (plataforma CB, mid10) y los perfiles radiales densitométricos de la madera se montaron en "Excel" [14], determinándose los valores de densidad aparente media, máxima y mínima por árbol y por clon. A partir de los perfiles densitométricos, se elaboraron tablas con las ecuaciones de las regresiones polinomiales de cada clon. Posteriormente se obtuvo el índice de uniformidad [15] de la madera de los árboles de los clones de la especie e híbrido de eucalipto, estableciendo las clases de variación de la densidad en la sección radial y su multiplicación por el factor de corrección que no es más que un desvío patrón medio encontrado para la especie e híbrido de eucaliptos. Valores del índice de uniformidad

próximos a 100 son indicadores de mayor uniformidad en el sentido médula-corteza, así mismo, cuanto mayor el índice mayor la heterogeneidad.

$$IU = \sum_{i=1}^i X_i * K_i$$

Donde:

IU = índice de uniformidad (%);

X = porcentaje de madera en cada clase de variación de la densidad;

K = coeficiente de ponderación (0,05 g/cm³), de aumento o disminución de la densidad respecto a la media;

i = número de clases establecidas.

Resultados y discusión

Densidad por densitometría e IU de la madera: clones de *E. grandis*

A partir de los perfiles densitométricos se elaboraron las curvas de variación radial de la densidad aparente de la madera de los árboles de cada clon (Figura 1) y las respectivas ecuaciones de las curvas de ajuste (Tabla 1), permitiendo visualizar mejor las diferencias entre clones. El análisis de la variación radial de la densidad aparente del leño de cada clon permitió caracterizar 3 modelos de variación, a saber (i) ligero aumento de los valores medios de la densidad de la madera en el sentido médula - corteza, en los clones 19 (árbol 107, 120; Figura 1a); 27 (árbol 143, Figura 1c) y 31 (árbol 103, Figura 1e), (ii) valores medios de la densidad aparente de la madera prácticamente lineales de la médula hasta la corteza en el clon 28 (árbol 138, Figura 1d) y (iii) aumento de los valores medios de la densidad de la madera próximo a la región de la médula (hasta cerca de 1,5 cm), seguido de una reducción (hasta cerca de 3,5-4,0 cm) y un posterior aumento en dirección a la corteza en los clones 19 (árbol 110, Figura 1a), 21 (árboles 108, 114, 123 Figura 1b), 27 (árboles 125, 126 Figura 1c), 28 (árboles 111, 122; Figura 1d) y 31 (árboles 104, 150 Figura 1e).

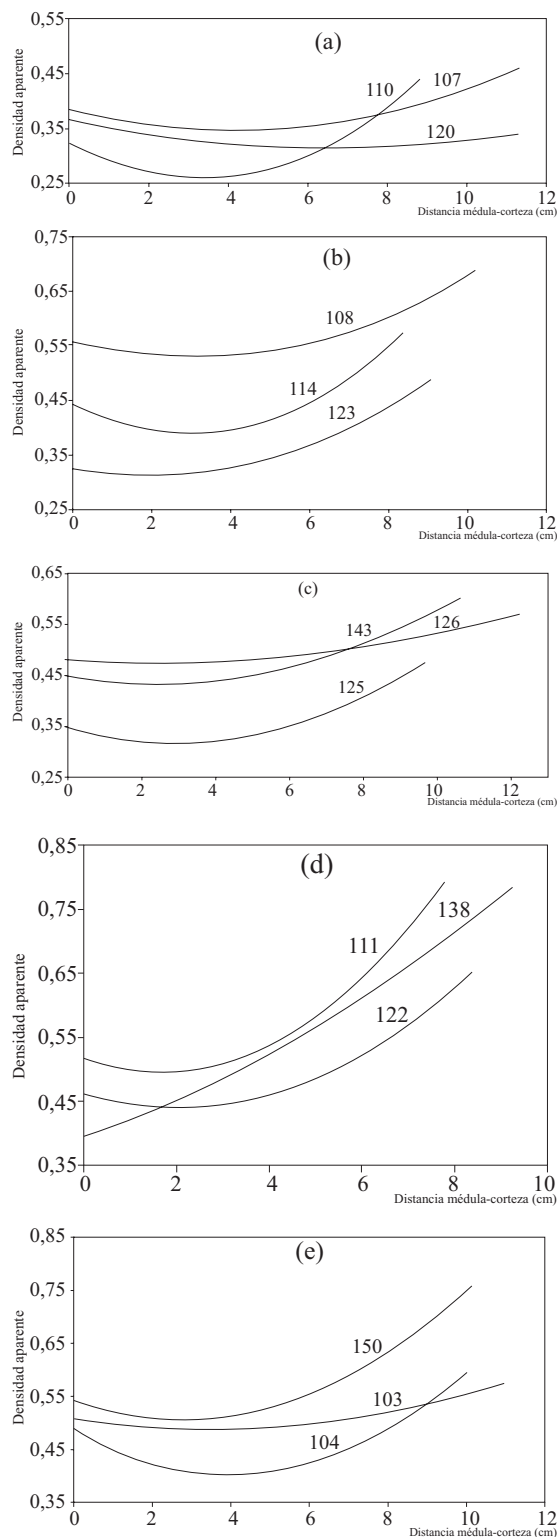


Figura 1 Variación radial de la densidad aparente de la madera de los árboles de los clones de *Eucalyptus grandis* (a) 19, (b) 21, (c) 27, (d) 28 y (e) 31

Los modelos de variación de la densidad aparente de la madera indican, de modo general, la formación de 3 tipos de madera, (i) en la región interna del tronco, ocupando de la médula hasta 50-75% del radio de las muestras, caracterizado por la baja densidad y asociado con la madera juvenil, (ii) en la región externa del tronco, próxima a la corteza y a 100% del radio con valores más altos de densidad, asociado con madera adulta, (iii) entre las regiones interna y externa del tronco, con variaciones graduales de densidad, asociada a madera de transición. La delimitación de la madera juvenil y adulta en los clones de *E. grandis* a los 8 años de edad, no está perfectamente definida, siendo más perceptible en árboles de mayor edad, cuando la actividad del cambium propicia la formación de nuevas capas de leño con características de adulto.

Tabla 1 Ecuaciones de regresión polinomial de densidad aparente de la madera (Y), en función de la distancia médula-corteza (x) de los 3 árboles de los clones de *E. grandis*

| Clon (n°) | Árbol (n°) | Ecuación $Y=a+b_1x_1+b_2x_2^2$ |
|-----------|------------|--------------------------------|
| 19 | 107 | $Y=0,3842-0,0182x+0,0022x^2$ |
| | 110 | $Y=0,3232-0,0398x+0,006x^2$ |
| | 120 | $Y=0,3654-0,0158x+0,0012x^2$ |
| 21 | 108 | $Y=0,5573-0,0196x+0,0032x^2$ |
| | 114 | $Y=0,4429-0,037x+0,0063x^2$ |
| | 123 | $Y=0,3247-0,0138x+0,0035x^2$ |
| 27 | 125 | $Y=0,3455-0,0198x+0,0034x^2$ |
| | 126 | $Y=0,4493-0,0124x+0,0025x^2$ |
| | 143 | $Y=0,4799+0,005x+0,001x^2$ |
| 28 | 111 | $Y=0,5169-0,0268x+0,008x^2$ |
| | 122 | $Y=0,4615-0,0216x+0,0053x^2$ |
| | 138 | $Y=0,3938+0,0246x+0,0019x^2$ |
| 31 | 103 | $Y=0,5071-0,0114x+0,0016x^2$ |
| | 104 | $Y=0,4898-0,0437x+0,0054x^2$ |
| | 150 | $Y=0,5425-0,0265x+0,0047x^2$ |

Los valores mínimos, máximos y medios de la densidad aparente y los índices de uniformidad de la madera obtenidos de los perfiles densitométricos de la madera de los clones de *E. grandis* se muestran en la tabla 2. En cuanto a la densidad media del leño de cada clon, los valores indican los de densidad más baja (clones 19, 21 y 27, con 0,34, 0,45 y 0,45 g/cm³, respectivamente) y los de más alta (clones 28 y 31, con 0,54 y 0,51 g/cm³, respectivamente). Las medias de la densidad máxima del leño de los árboles indican los clones con valores más bajos (clon 19, con 0,58 g/cm³) y más altos (clones 28 y 31, con 0,92 y 0,85 g/cm³, respectivamente). Las medias de la densidad mínima del leño indican clones con valores más bajos (clones 19 y 27, con 0,15 y 0,21 g/cm³, respectivamente) y más altos (clones 28 y 31, con 0,28 y 0,28 g/cm³, respectivamente).

El índice de uniformidad de la madera de los árboles de *E. grandis* evidenció las variaciones existentes dentro y entre sus clones y un valor medio de 169,5 (coeficiente de variación: 11%) (Tabla 2). Los trabajos de [15], presentan valores de índices de uniformidad de 223, 240 y 317 para árboles de *Pinus contorta*, *P. ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii*, superiores al obtenido para los clones de *E. grandis*. Cabe destacar, que se trata de árboles adultos de especies de coníferas de clima templado y con su leño presentando una estructura anatómica caracterizada por la alternancia de anillos de crecimiento anuales de leño inicial (menor densidad) y tardío (mayor densidad) y elevado contenido de madera adulta en relación a juvenil. Estos parámetros dan a estas especies características de madera con elevada heterogeneidad en el sentido médula-corteza, comparada con el leño de árboles jóvenes de *E. grandis*, de 8 años de edad, mostrando menores variaciones de la estructura anatómica, de las tasas de crecimiento anuales y nítida predominancia de madera juvenil. Los valores de índice de uniformidad (IU) de la madera entre los clones de *E. grandis*, variaron de 142 (clon 19) a 206 (clon 28) reflejando, para los índices más bajos, la formación de madera con características de homogeneidad en los árboles de 4 clones (19, 21, 27 y 31) y, para los índices más altos, la madera de

mayor heterogeneidad en el 5o clon (28) (Tabla 2). Los índices de uniformidad están también relacionados con los modelos de variación de la densidad aparente de la madera en el sentido médula-corteza, o sea, menores variaciones radiales de densidad indican valores más bajos de índice de uniformidad. La distribución de las clases de densidad aparente de la madera en valores porcentuales de los árboles de los 5 clones de *E. grandis* presentada en la figura 2 indica (i) una relación entre los modelos de variación de los valores de densidad

y respectivos índices de uniformidad y (ii) estratificación de los clones por la densidad aparente de sus maderas. En esa estratificación, el clon 19 se localiza en el extremo inferior (densidad media de 0,34 g/cm³; datos se concentran entre valores de 0,2-0,5 g/cm³); los clones 21 y 27 en la posición central (densidad media de 0,45 g/cm³; 95% de los valores entre 0,2-0,7 g/cm³); los clones 28 y 31 en el extremo superior (densidad media de 0,54 y 0,51 respectivamente; 95% de los valores entre 0,32-0,90 g/cm³).

Tabla 2 Valores máximos, mínimos y medios de la densidad aparente e índice de uniformidad de la madera de los árboles de los clones de *E. grandis*

| Clon (nº) | Árbol (nº) | Densidad aparente (g/cm ³) | | | Índice de Uniformidad |
|--------------|---------------|--|--------|-------|-----------------------|
| | | Máxima | Mínima | Media | |
| | 107 | 0,56 | 0,18 | 0,38 | 146,8 |
| 19 | 110 | 0,64 | 0,13 | 0,30 | 150,4 |
| | 120 | 0,53 | 0,14 | 0,33 | 128,8 |
| Media | | 0,58 | 0,15 | 0,34 | 142,0 |
| | 108 | 0,74 | 0,32 | 0,57 | 146,1 |
| 21 | 114 | 0,73 | 0,21 | 0,43 | 148,5 |
| | 123 | 0,67 | 0,16 | 0,36 | 154,4 |
| Media | | 0,71 | 0,23 | 0,45 | 149,7 |
| | 125 | 0,66 | 0,12 | 0,36 | 166,1 |
| 27 | 126 | 0,82 | 0,22 | 0,48 | 162,8 |
| | 143 | 0,96 | 0,30 | 0,51 | 186,3 |
| Media | | 0,81 | 0,21 | 0,45 | 171,7 |
| | 111 | 0,92 | 0,29 | 0,57 | 201,9 |
| 28 | 122 | 0,88 | 0,25 | 0,50 | 174,3 |
| | 138 | 0,96 | 0,29 | 0,56 | 242,2 |
| Media | | 0,92 | 0,28 | 0,54 | 206,1 |
| | 103 | 0,92 | 0,28 | 0,51 | 169,2 |
| 31 | 104 | 0,78 | 0,24 | 0,45 | 167,9 |
| | 150 | 0,84 | 0,32 | 0,57 | 196,5 |
| Media | | 0,85 | 0,28 | 0,51 | 177,9 |

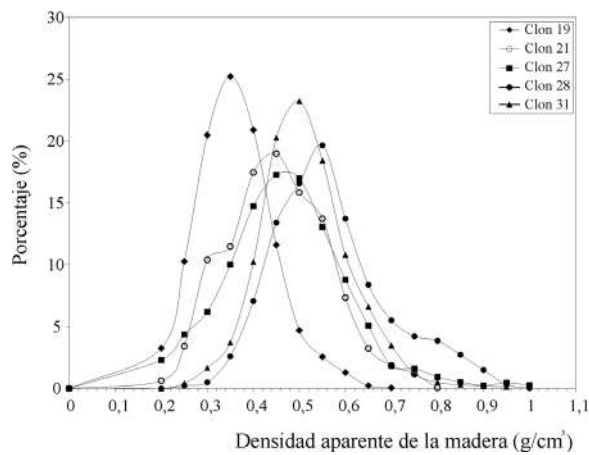


Figura 2 Distribución de las clases de densidad aparente de la madera de los clones de *E. grandis*

Los resultados del presente trabajo posibilitan, a partir de la metodología propuesta por [15], incluir un nuevo parámetro (índice de uniformidad) de calidad de la madera de *Eucalyptus* calculado con la aplicación de los valores puntuales de densidad aparente por densitometría de rayos X. Este parámetro deberá contribuir en el mejoramiento y en la tecnología y uso de la madera de *Eucalyptus*, por la clasificación de árboles y/o clones con diferentes niveles de homogeneidad de la madera y para aplicaciones específicas, sea como madera sólida o transformada.

Densidad por densitometría e IU de la madera: clones de *E. grandis* x *urophylla*

A partir de los perfiles densitométricos de los 3 árboles de cada clon de *E. grandis* x *urophylla* se elaboraron las curvas de variación de densidad aparente de la madera de los árboles de cada clon (Figura 3) y sus respectivas ecuaciones de las curvas de ajuste (Tabla 3), permitiendo visualizar mejor las diferencias entre los clones. El análisis de la variación radial de densidad aparente de la madera de cada clon hizo posible caracterizar 4 modelos de variación, a saber, (i) aumento de los valores medios de la densidad en el sentido médula-corteza, en los clones 9 (árbol 99, Figura 3a), 11 (árbol 83, Figura 3b), 24 (árbol 78, Figura 3d) y 26 (árbol 80, Figura 3e), (ii) decrecimiento

de los valores medios de la densidad próximo a la región de la médula (hasta cerca de 3 cm), seguido del aumento en dirección a la corteza, en los clones 9 (árbol 100, Figura 3a), 11 (árbol 77, 91, Figura 3b), 15 (árbol 53, 76, Figura 3c), 24 (árbol 60; Figura 3d) y 26 (árboles 61 y 68, Figura 3e), (iii) valores medios de densidad aparente decrecientes (hasta cerca de 4 cm en la región próxima a la médula) seguido del aumento hasta la corteza, clon 9 (árbol 72, Figura 3a) y 24 (árbol 87, Figura 3d) y (iv) aumento casi lineal de la densidad aparente en el sentido médula-corteza, clon 15 (árbol 95, Figura 3c). A ejemplo de los resultados obtenidos para los clones de *E. grandis*, estas variaciones en los árboles de los clones de *E. grandis* x *urophylla* indican la formación de madera juvenil, de transición y adulta a partir de la médula en dirección a la corteza.

Los valores máximos, medios y mínimos de la densidad aparente de la madera y los índices de uniformidad de la madera de los clones de *E. grandis* x *urophylla* obtenidos en la dirección médula-corteza se listan en la tabla 4. En cuanto a la densidad aparente media del leño de cada clon los valores indican los de densidad más baja (clon 15, con 0,49 g/cm³) y los de más alta (clon 11, con 0,58 g/cm³). Las medias de densidad aparente máxima del leño de los árboles indican los clones con valores más bajos (clones 15 y 26, con 0,94 y 0,96 g/cm³, respectivamente) y los más altos (clones 11 y 24, con 1,05 y 1,00 g/cm³, respectivamente). Las medias de densidad aparente mínima del leño indican clones con valores más bajos (clones 15 y 24, con 0,29 y 0,30 g/cm³, respectivamente) y los más altos (clon 11, con 0,34 g/cm³).

El índice de uniformidad de la madera de los clones del híbrido de eucalipto tuvo un valor medio de 193 (coeficiente de variación: 13,3) (Tabla 4). Mientras que los clones 11 y 15 se destacaron por la mayor y menor variación (203 y 181 respectivamente) seguidos de los clones 26 y 9 (192) indicando la formación de madera con características de mayor heterogeneidad en los árboles de los clones. Similar al *E. grandis* se observó una relación entre los modelos de variación y los

índices de uniformidad de los clones del híbrido, con las mayores variaciones radiales de densidad indicando valores más altos de índices de uniformidad. La distribución de las clases de densidad aparente de la madera de los árboles de los clones del híbrido (Figura 4) indica una estratificación: los clones 15 y 26 se localizan en el extremo inferior (densidades medias de 0,49 y 0,53 g/cm³, respectivamente; con los datos concentrados en los valores de 0,32-0,84 g/cm³); los clones 9 y 24 en la posición intermedia (densidades medias de 0,54 y 0,55 g/cm³, respectivamente; datos concentrados en los valores de 0,34-0,86 g/cm³); el clon 11 en el extremo superior (densidad media de 0,58 g/cm³; datos concentrándose en los valores de 0,40-0,90 g/cm³).

Tabla 3 Ecuaciones de regresión polinomial de densidad aparente (Y), en función de la distancia médula-corteza (x) de los 3 árboles de los clones de *E.grandis x urophylla*

| Clon (nº) | Árbol (nº) | Ecuación $Y=a+b_1x+b_2x^2$ |
|-----------|------------|------------------------------|
| | 72 | $Y=0,6567-0,0936x+0,0093x^2$ |
| 09 | 99 | $Y=0,4208-0,0083x+0,005x^2$ |
| | 100 | $Y=0,6276-0,0509x+0,0071x^2$ |
| | 77 | $Y=0,6291-0,0446x+0,0081x^2$ |
| 11 | 83 | $Y=0,5594-0,029x+0,0045x^2$ |
| | 91 | $Y=0,5095-0,0191x+0,0043x^2$ |
| | 53 | $Y=0,4845-0,0789x+0,0131x^2$ |
| 15 | 76 | $Y=0,5154-0,0316x+0,0056x^2$ |
| | 95 | $Y=0,3716+0,0189x+0,0009x^2$ |
| | 60 | $Y=0,5785-0,0772x+0,0113x^2$ |
| 24 | 78 | $Y=0,5489-0,0096x+0,0041x^2$ |
| | 87 | $Y=0,5274-0,0335x+0,0043x^2$ |
| | 61 | $Y=0,013-0,0792x+0,013x^2$ |
| 26 | 68 | $Y=0,5135-0,0756x+0,0122x^2$ |
| | 80 | $Y=0,5249-0,0016x+0,0028x^2$ |

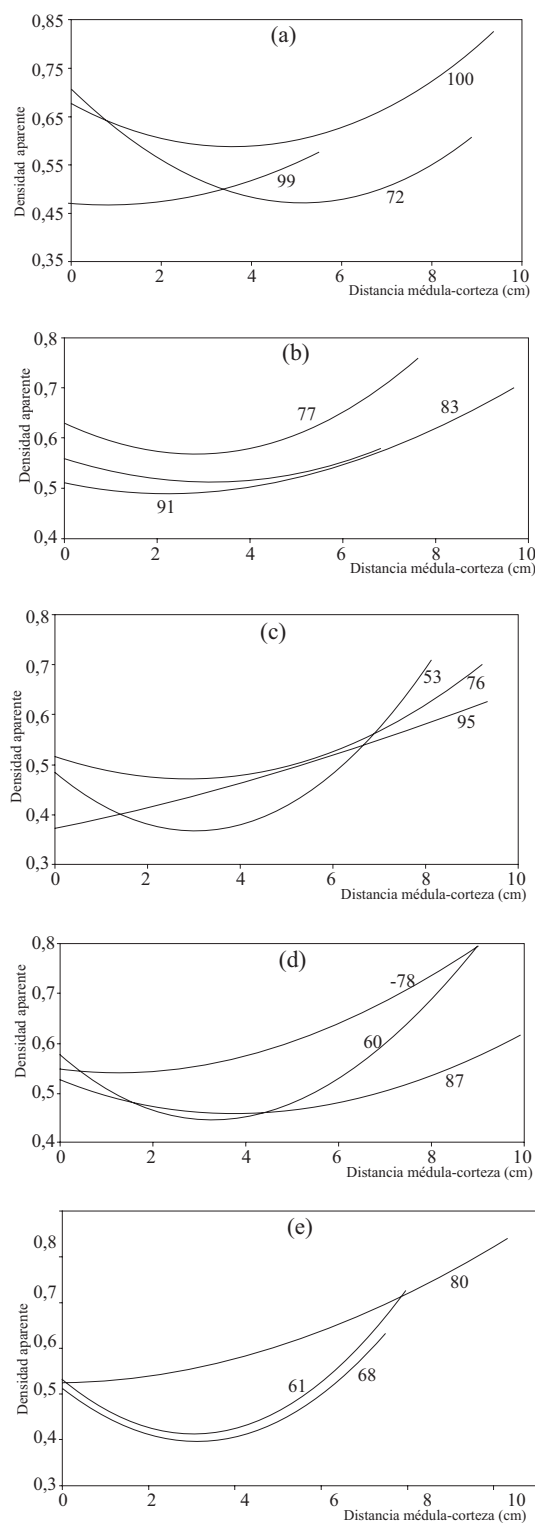


Figura 3 Variación radial de la densidad aparente de la madera de los árboles de los clones de *Eucalyptus grandis x urophylla* (a) 9, (b) 11, (c) 15, (d) 24 y (e) 26

Tabla 4 Valores máximos, mínimos y medios de densidad aparente e índice de uniformidad de la madera de los árboles de los clones de *E. grandis x urophylla*

| Clon (n°) | Árbol (n°) | Densidad aparente (g/cm ³) | | | Índice de Uniformidad |
|--------------|---------------|--|--------|-------|-----------------------|
| | | Máxima | Mínima | Media | |
| 09 | 72 | 0,89 | 0,27 | 0,49 | 174,2 |
| | 99 | 1,08 | 0,32 | 0,53 | 227,2 |
| | 100 | 0,98 | 0,36 | 0,59 | 176,1 |
| Media | | 0,98 | 0,32 | 0,54 | 192,5 |
| 11 | 77 | 1,01 | 0,35 | 0,59 | 177,7 |
| | 83 | 1,10 | 0,30 | 0,55 | 188,1 |
| | 91 | 1,04 | 0,37 | 0,60 | 242,4 |
| Media | | 1,05 | 0,34 | 0,58 | 202,7 |
| 15 | 53 | 1,02 | 0,27 | 0,45 | 181,2 |
| | 76 | 0,96 | 0,33 | 0,53 | 171,2 |
| | 95 | 0,85 | 0,27 | 0,48 | 190,1 |
| Media | | 0,94 | 0,29 | 0,49 | 180,8 |
| 24 | 60 | 1,07 | 0,29 | 0,54 | 211,6 |
| | 78 | 1,07 | 0,35 | 0,61 | 213,2 |
| | 87 | 0,87 | 0,27 | 0,50 | 166,3 |
| Media | | 1,00 | 0,30 | 0,55 | 197,0 |
| 26 | 61 | 0,98 | 0,27 | 0,49 | 192,5 |
| | 68 | 0,86 | 0,27 | 0,46 | 172,0 |
| | 80 | 1,05 | 0,41 | 0,63 | 212,2 |
| Media | | 0,96 | 0,32 | 0,53 | 192,2 |

Densidad aparente media e índice de uniformidad de la madera de los clones de *E. grandis* y *E. grandis x urophylla*

Los valores de densidad aparente e índice de uniformidad medio de la madera obtenida para la especie e híbrido de eucalipto se presentan en la tabla 5, con los clones de *E. grandis* mostrando

menores valores de densidad aparente y madera más homogénea en relación al híbrido. Para la especie e híbrido de *Eucalyptus* se observaron diferencias entre los clones para los valores de densidad aparente de la madera y del índice de uniformidad, con valores medios de 0,46 g/cm³; 0,54 g/cm³; 169,5 y 193, para el *E. grandis* y *E. grandis x urophylla*, respectivamente.

Tabla 5 Densidad aparente media e índice de uniformidad de la madera de los clones de *E. grandis* y *E. grandis x urophylla*

| <i>Especie</i> | <i>Clon (nº)</i> | <i>Densidad aparente media de la madera (g/cm³)</i> | <i>Índice de Uniformidad</i> |
|-------------------------------|------------------|---|------------------------------|
| <i>E. grandis</i> | 19 | 0,34 | 142,0 |
| | 21 | 0,45 | 149,7 |
| | 27 | 0,45 | 171,7 |
| | 28 | 0,54 | 206,1 |
| | 31 | 0,51 | 177,9 |
| | Media | 0,46 | 169,5 |
| <i>E. grandis x urophylla</i> | 09 | 0,54 | 192,5 |
| | 11 | 0,58 | 202,7 |
| | 15 | 0,49 | 180,8 |
| | 24 | 0,55 | 197,0 |
| | 26 | 0,53 | 192,2 |
| Media | 0,54 | 193,0 | |

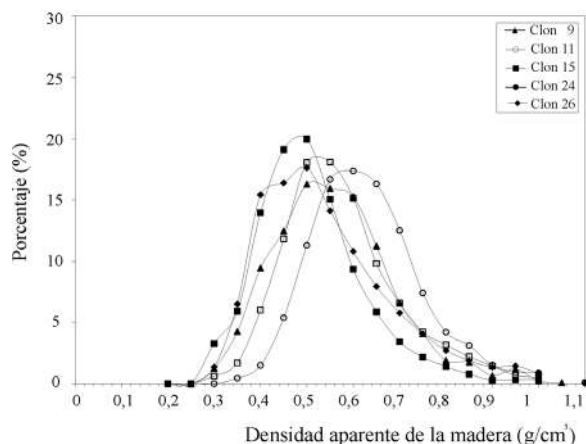


Figura 4 Distribución de clases de densidad aparente de la madera de los clones de *E. grandis x urophylla*

La obtención de los índices de uniformidad de la madera proporciona la inclusión de un nuevo parámetro de calidad de la madera a ser introducido en los programas de mejoramiento forestal y de tecnología y utilización de la madera de *Eucalyptus*.

Conclusiones

- Se caracterizaron 3 modelos de variación radial de la densidad y la formación de 3 tipos de madera (juvenil, de transición y adulta); el valor medio de densidad aparente de la madera fue de 0,46 g/cm³ y 0,54 g/cm³ para los clones de *E. grandis* y *E. grandis x urophylla*, respectivamente.
- Los valores del índice de uniformidad de la madera indican que los árboles de los clones de *E. grandis* (a excepción del clon 28) poseen madera relativamente homogénea, con los clones de *E. grandis x urophylla* (a excepción del clon 15) mostrando madera más heterogénea.
- La obtención de índices de uniformidad de la madera, proporciona la inclusión de un nuevo parámetro de calidad de la madera que se debe introducir en los programas de mejoramiento forestal y de tecnología y utilización de la madera de *Eucalyptus*.

- Las maderas con características de mayor homogeneidad de la densidad en el sentido radial, deben presentar mejores propiedades tecnológicas (defectos de secado, variación dimensional, etc.) y mayor aprovechamiento en el proceso de desdoble (*E. grandis*). Al contrario, maderas más heterogéneas en relación a la densidad (clones de *E. grandis* x *urophylla*, destacando los de número 11 y 24) deben presentar maderas con menores rendimientos en aserríos.

Referencias

1. H. Schmitz. "Collective Efficiency: Growth Path for Small-Scale Industry". *The Journal of Development Studies*. Vol.31.1995. pp.529-566.
2. A. C. B. Amaral. *Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira*. Piracicaba. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 1994. pp. 155.
3. J. T. S. Oliveira. *Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997. pp. 429.
4. J. T. S. Oliveira. "O potencial do eucalipto para a produção de madeira sólida". *Revista da Madeira*. Vol.75. 2003. pp. 1 – 8.
5. J. C. Silva. "Influência dos tratamentos silviculturais na qualidade da madeira". *Revista da Madeira*. Vol.75. 2003. pp. 1 – 10.
6. J. C. Silva. *Caracterização da madeira de E. grandis de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira*. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Paraná. Curitiba, 2002. pp.160.
7. O. F. Ruy. *Variação da qualidade da madeira em clones de Eucalyptus urophyll*. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. pp. 69.
8. J. C. Silva. T. F. Assis. J. T. Oliveira. "Melhoramento genético para a qualidade da madeira". *Revista da Madeira*. Vol.75. 2003. pp. 10.
9. M. Ferreira. "Melhoramento e Silvicultura intensiva clonal". *IPEF*. Vol. 45. 1992. pp. 22 – 30.
10. I. E. Pires, R.C. Paula. "Estado da arte de melhoramento genético florestal para qualidade da madeira". CRC for temperate hardwood forestry – IUFRO, Salvador, 1997. *Anais*. Salvador: CRCTHF; IUFRO, 1997. p.7.
11. M.D.V.Resende. A.R. Higa. "Estratégias de melhoramento para eucaliptos visando a seleção de híbridos". *Curitiba: Boletim de Pesquisa Florestal*. Vol.2. 1990. pp. 49-60.
12. E. Campinhos Jr., C. da-silva Jr. "Desenvolvimento do *Eucalyptus* do futuro". *Congreso latinoamericano de celulose e papel*, 6, São Paulo, 1990. Trabalho convidado, SBS/SBEF, 1990. pp. 55-72.
13. A. R. Griffin, J. A. Rivelli. "A comment on clonal eucalypt plantation". *Eucalyptus Improvement and Silviculture*. Vol.1. 1993. p. 1 5.
14. A. C. B. Amaral. T. Filho. "M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* L. segundo a microdensitometria de raios X". *Revista de Ciência e Tecnologia*. Vol. 6. 1998. pp. 17 – 23.
15. R. M. Echols. "Uniformity of wood density assessed from X-rays of increment cores". *Wood Science and Technology*. Vol. 7. 1973. pp. 34-44.