

**Proyecto de  
Tecnología de Ensayo  
de Productos Forestales  
LATU-JICA  
(1998-2003)**

**Densidad, Dureza y Color  
de *Eucalyptus grandis* de Uruguay**

**Ing. Quím. Silvia Böthig**

**Informe de Investigación N°5  
Julio 2001**



## **PRÓLOGO**

En este trabajo se expone una investigación realizada en el Sector Productos Forestales del LATU en Montevideo, Uruguay, en el marco del “Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales” con JICA, Agencia de Cooperación Internacional del Japón.

Con esta serie de publicaciones el LATU pretende contribuir a la difusión tecnológica como una herramienta para el desarrollo forestal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Sadaaki Ohta por su valioso aporte y su invaluable colaboración.

Al Ing. Quím. Raúl de Castro, Jefe del Sector Productos Forestales, por su supervisión.

A la empresa COFUS.A., por el apoyo brindado en esta investigación.

Al Sr. Harushi Kobayashi de JICA, por la cooperación otorgada en todo momento.

Al equipo técnico del Sector Productos Forestales del LATU.

# DENSIDAD, DUREZA Y COLOR DE *Eucalyptus grandis* DE URUGUAY

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
<u>RESUMEN</u> .....	1
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>MATERIAL</u> .....	3
2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA ENSAYADA.....	3
2.2. PREPARACIÓN DE PROBETAS Y ACONDICIONAMIENTO .....	3
3. <u>METODOLOGÍA</u> .....	3
3.1. DENSIDAD.....	3
3.2. DUREZA JANKA.....	4
3.3. COLOR .....	4
3.4. PENETRACIÓN POR PILODYN .....	5
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	6
4.1. DISTRIBUCIÓN DE INDICADORES .....	6
4.1.1. <u>Densidad</u> .....	6
4.1.2. <u>Dureza Janka</u> .....	7
4.1.3. <u>Color</u> .....	8
4.1.4. <u>Penetración por Pilodyn</u> .....	11
4.2. RELACIONES ENTRE INDICADORES .....	12
4.2.1. <u>Dureza Janka y densidad</u> .....	12
4.2.2. <u>Color y densidad</u> .....	14
4.2.3. <u>Pilodyn y densidad – Pilodyn y dureza Janka</u> .....	17
4.3. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE UNA MADERA DE ACUERDO AL USO FINAL .....	19
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	21
6. <u>REFERENCIAS</u> .....	23

# DENSIDAD, DUREZA Y COLOR DE *Eucalyptus grandis* DE URUGUAY

## RESUMEN

Se trabajó con madera de duramen de *Eucalyptus grandis* proveniente de un monte del departamento de Rivera, al norte de Uruguay. Se analizaron cuatro indicadores de calidad: **densidad** y **dureza Janka** para la evaluación de la calidad de la madera, **penetración del Pilodyn** como estimación de la dureza y **color** (sistema CIELAB) como propiedad asociada al uso final.

Se halló una dependencia lineal entre la densidad y la dureza Janka, que permitiría manejar la densidad como indicador de calidad de la madera en lugar de la dureza Janka.

El Pilodyn, método de más fácil aplicación en el área forestal, promete ser una herramienta confiable para la estimación de la densidad y la dureza.

Se buscó relación entre el color y la densidad de la madera de *E. grandis* con el objetivo de clasificar la madera de una forma sencilla y rápida en el procesamiento industrial.

No es posible afirmar que el color sea un indicador de calidad útil para el mejoramiento genético, siendo probablemente influido por el medio ambiente.

Si bien la madera de *E. grandis* se industrializa actualmente con buenos resultados, mediante un aumento en la densidad y una mayor homogeneidad, se le promovería para usos más exigentes.

PALABRAS CLAVE: *Eucalyptus grandis*, densidad, dureza Janka, color

## 1. INTRODUCCIÓN

El *Eucalyptus* es uno de los géneros de rápido crecimiento más difundidos en el mundo en las últimas décadas. En Uruguay, bajo el Plan Nacional de Forestación, el apoyo estatal ha estimulado su plantación. En el año 2000, el 80% de la superficie forestada estaba ocupada por *Eucalyptus spp.* A su vez dentro de este género, el *Eucalyptus grandis* es la especie más importante con destino a aserrío. Actualmente el sector industrial se enfrenta a ciertas dificultades en su procesamiento y con materia prima de características heterogéneas en cuanto a densidad, resistencia y color.

La densidad es un índice de calidad de la madera que está íntimamente asociado a las propiedades mecánicas y a otras propiedades físicas. Es un factor determinante de su aptitud para la industrialización. Para uso estructural son limitantes las resistencias a la flexión y a la compresión. Se puede predecir el comportamiento de una madera frente a distintos esfuerzos a partir de su densidad, si se considera el efecto negativo de la presencia de ciertos defectos como nudos, corazón esponjoso o madera de tensión. Para la fabricación de muebles es importante la resistencia a estos esfuerzos pero también tienen gran peso la dureza y las propiedades superficiales. En el caso de pisos, la dureza es un factor restrictivo, mientras que en ambos casos el color va asociado a la estética del producto final. Si bien el color no es en primera instancia una limitación para la producción, juega un papel importante para el consumidor final. Su variabilidad obliga a una clasificación en la planta industrial para lograr homogeneidad. Por otro lado, se presume cierta relación entre el color y la densidad, esperándose menor densidad cuanto más clara es la madera.

Los objetivos del presente trabajo son estudiar la densidad, dureza y color en madera de duramen de *Eucalyptus grandis* proveniente de un monte en Uruguay, y analizar la interrelación de estas propiedades.

Asimismo, se estudia el color como indicador de calidad de la madera y se investiga la penetración del Pilodyn como un rápido método no destructivo para la estimación de la dureza y la densidad.

Es el interés de este trabajo mostrar la necesidad de estudiar la adecuación al uso final para realizar un mejor aprovechamiento de la madera como materia prima y para la planificación de un mejoramiento genético enfocado a la calidad.

## **2. MATERIAL**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA ENSAYADA**

Las investigaciones fueron realizadas sobre madera de duramen de *Eucalyptus grandis* proveniente de una misma parcela de un monte de:

- ♣ 13,5 años de edad
- ♣ Ubicado en el departamento de Rivera, al norte del Uruguay.
- ♣ Procedencia de semilla: Bañados Medina.
- ♣ Densidad de plantación: 1100 árboles/há.
- ♣ Manejo silvicultural: Raleos dejando 500 árboles/há a los 8 años.  
Sin podas.

La madera fue secada en horno industrial al 10%.

Mediante un diseño factorial de un solo factor (momento de muestreo), se extrajeron 3 lotes emergentes del secadero, elegidos al azar en el tiempo y que fueron identificados como Lote 1, Lote 2 y Lote 3.

### **2.2. PREPARACIÓN DE PROBETAS Y ACONDICIONAMIENTO**

De los lotes 1, 2, y 3 se obtuvieron al azar 300, 300 y 263 ejemplares de ensayo respectivamente.

Las probetas fueron confeccionadas prismáticas a partir de madera sin defectos, de corte tangencial o semitangencial, con sus caras cepilladas y con dimensiones de 20 mm x 40 mm x 50 mm.

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climatizada a 20°C y 55% de humedad relativa hasta el equilibrio, alcanzando un contenido de humedad en base seca promedio de 10,5%.

El contenido de humedad se midió de la siguiente manera:

Al comienzo de los ensayos fueron pesadas las probetas y luego de finalizados fueron secadas en estufa a  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  y vueltas a pesar. Las pesadas se hicieron en balanza Mettler Toledo PG503 S con una apreciación de 0,001 g.

## **3. METODOLOGÍA**

En cada probeta se midió la densidad, el color, la penetración por Pilodyn y la dureza Janka. El color y la dureza fueron ensayados en la cara tangencial más próxima a la médula, mientras que la penetración con el Pilodyn se efectuó en la cara opuesta. Todos los ensayos fueron realizados sobre las probetas acondicionadas en la cámara climatizada.

### **3.1. DENSIDAD**

La densidad se obtuvo como el cociente del peso anhidro sobre el volumen en las condiciones de acondicionamiento. Las pesadas se hicieron en balanza Mettler Toledo PG503 S con una apreciación de 0,001 g.

El volumen se obtuvo midiendo las dimensiones de la probeta. Se realizaron 3 determinaciones del espesor en una diagonal de las caras con un micrómetro digital Mitutoyo, de apreciación de 0,001 mm. Se efectuaron 3 medidas del ancho y 2 del largo, ambas con un calibre digital Mitutoyo con una apreciación de 0,01 mm.

### 3.2. DUREZA JANKA

Se efectuó, de acuerdo a la norma ASTM D143, una penetración en el centro de la cara con una semiesfera de acero en un área de  $1 \text{ cm}^2$ . La velocidad de ensayo fue  $6 \text{ mm/min}$ . Los ensayos se realizaron con una máquina universal de ensayos Minebea de  $250 \text{ kN}$  (AL-250kNB), utilizando una celda de carga de  $50 \text{ kN}$  de capacidad máxima, con una apreciación de  $0,001 \text{ kN}$ .

### 3.3. COLOR

Se empleó un espectrómetro Minolta CR 300 de las siguientes características: lámpara pulsante de arco de Xenón como iluminante, iluminación difusa y ángulo de observación  $0^\circ$ , de acuerdo a JIS K 5600-4-4:1999 y JIS K-4-5:1999.

Se realizaron 3 mediciones en una diagonal de la cara ensayada de cada probeta y luego se promediaron las coordenadas independientemente.

Se midieron las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  (sistema CIELAB) que representan el color de un sustrato y lo caracterizan como un punto en el espacio del color. Mientras que  $a^*$  y  $b^*$  definen al color,  $L^*$  es la luminosidad, un indicador de la claridad del color. Un valor de  $L^*=100$  representaría al color blanco y  $L^*=0$  al color negro. Valores negativos de  $a^*$  representan el verde, valores positivos el rojo. Valores positivos de  $b^*$  describen los amarillos, mientras que negativos los azules. El punto de corte de los ejes es el color gris.

Las coordenadas  $L^*a^*b^*$  fueron transformadas matemáticamente en otro sistema,  $L^*C^*H^*$ , donde  $L^*$  es la luminosidad,  $C^*$  la cromaticidad o saturación del color y  $H^*$  el tono del color. Las Figuras 1 y 2 muestran la representación gráfica espacial de las coordenadas del color, y como un mismo punto puede describirse tanto con las coordenadas  $L^*a^*b^*$  como con  $L^*C^*H^*$ .

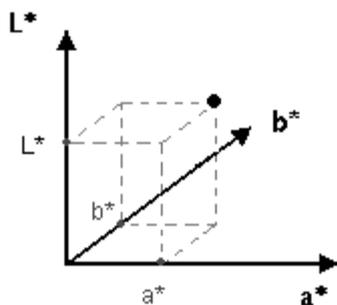


Figura 1 . Coordenadas  $L^*a^*b^*$

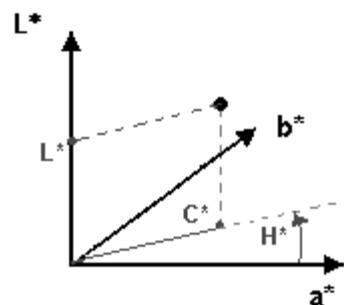


Figura 2. Coordenadas  $L^*C^*H^*$

Observar que el valor de  $C^*$  sería la distancia del origen de las coordenadas a la proyección del punto en el plano  $a^*$ ,  $b^*$ , mientras que el valor de  $H^*$  equivaldría al ángulo mostrado en la Figura 2.

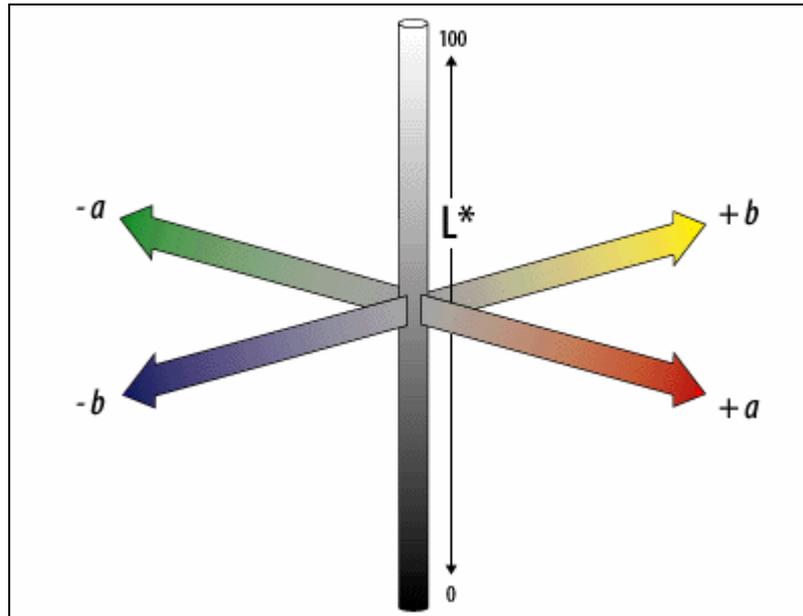


Figura 3. Ilustración del espacio del color

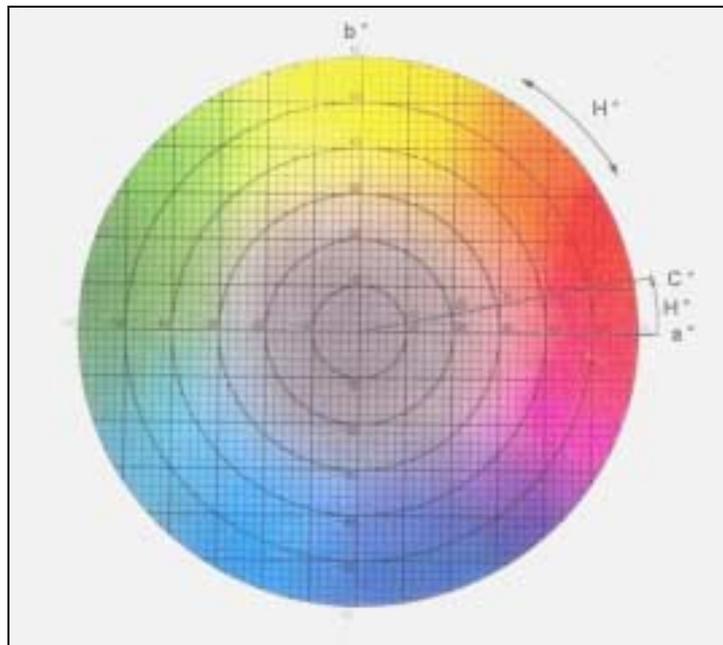


Figura 4. Ilustración de la variación del color según las coordenadas a\* y b\*

Las Figuras 3 y 4 muestran las coordenadas del color L\*a\*b\* y la equivalencia con L\*C\*H\*, según fue explicado anteriormente..

### 3.4. PENETRACIÓN POR PILODYN

El Pilodyn es un equipo suizo que realiza sobre la madera la penetración de una aguja de 2,5 mm de diámetro mediante un impacto de 6 J. Se mide la profundidad de penetración en mm. La profundidad máxima es de 40 mm.

Esta medición se realiza como estimación de la dureza y la densidad de la madera: una mayor penetración significaría menor dureza y menor densidad del sustrato.

Se realizó un ensayo en el centro de la cara de la probeta.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DISTRIBUCIÓN DE INDICADORES

#### 4.1.1. Densidad

Se analizó la distribución de la densidad de los tres lotes y del total de los ejemplares muestreados, que se muestra en el Gráfico 1.

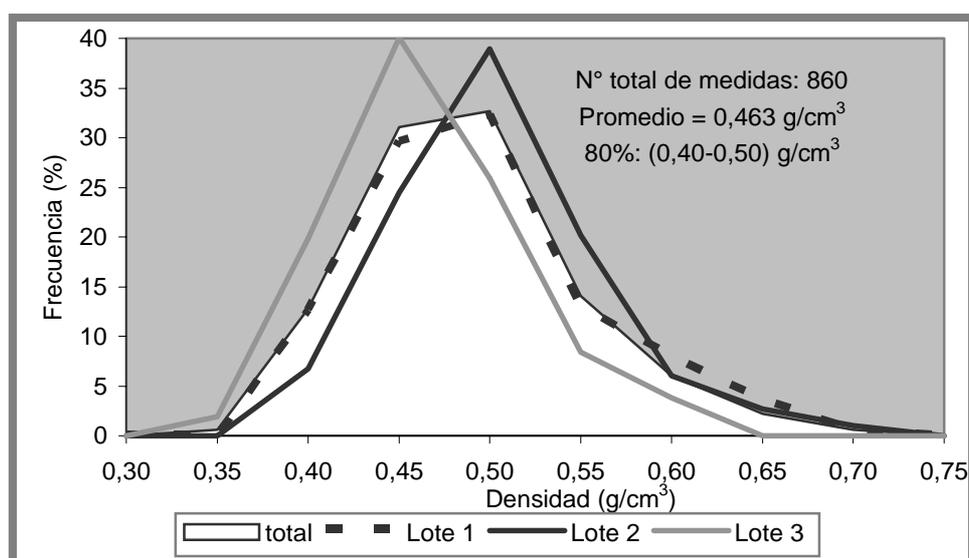


Gráfico 1. Curva de distribución de la densidad de los 3 lotes juntos y por separado

Tabla 1. Resumen de resultados de densidad

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Total
N° de medidas	300	298	262	860
Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0,469	0,477	0,441	0,463
Desviación estándar (g/cm <sup>3</sup> )	0,063	0,057	0,051	0,059
Mínimo (g/cm <sup>3</sup> )	0,358	0,361	0,322	0,322
Máximo (g/cm <sup>3</sup> )	0,669	0,691	0,600	0,691
CV (%)	13	12	12	13

Según el test t de Student para comparación de medias con distinta varianza realizado en los resultados de densidad con  $\alpha=0,05$ , Lote1=Lote2; Lote2≠Lote3; Lote1≠Lote3. Teniendo en cuenta que los tres lotes provienen de un mismo monte (misma procedencia de semilla, mismo sitio, mismo manejo y misma edad) y sufrieron el mismo proceso industrial (secado en horno a baja temperatura), y considerando la forma en que se realizó el muestreo (totalmente al azar), no es posible asignar una causa determinada a esta diferencia de medias. La diferencia hallada entre ellas se podría atribuir a la variabilidad natural.

La columna identificada como “Total” se refiere al conjunto de los 3 lotes tratados estadísticamente como uno sólo, independientemente del tiempo de muestreo. En esta oportunidad y más adelante en este trabajo, se utilizan los datos de los 3 lotes como datos individuales provenientes de una única población para obtener un resultado más representativo.

Si se compara con datos de otras especies (Forest Products Laboratory, 1990), el coeficiente de variación (CV) de todo el lote (13%) no es excesivamente grande, teniendo en cuenta que la madera estudiada proviene de árboles jóvenes de rápido crecimiento. Es necesario tener en cuenta que el material estudiado proviene de un muestreo global de toda la madera procesada industrialmente, y por lo tanto incluye madera juvenil, madera adulta y madera de distintas alturas en la troza. Este coeficiente de variación responde entonces a la variabilidad de la densidad dentro del árbol, además de la variabilidad entre árboles del monte. De todos modos es de esperar, según estudios anteriores, que la variabilidad entre árboles tenga una mayor importancia (Pérez del Castillo, A. 2001).

La varianza de estos 3 lotes se estimó como la suma de dos componentes, la variabilidad propia de la propiedad en cada lote y la variabilidad introducida por los niveles de tratamiento (3 lotes) (Montgomery, D. C. 1991). A partir de esta varianza se realizó el cálculo del intervalo de predicción (IP) para una probabilidad de 0,95, previéndose una variación de la densidad de la madera del monte muestreado, entre 0,328 y 0,599 g/cm<sup>3</sup>. Esto significa que cualquier elemento proveniente de esa parcela tendrá una probabilidad de 0,95 de tomar un valor entre 0,328 y 0,599 g/cm<sup>3</sup>.

Además, podemos afirmar con un 95% de confianza que la densidad promedio de la madera proveniente de la parcela estudiada será (0,463 ± 0,0046) g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2. Dureza Janka

Se estudió la distribución de la dureza Janka de los tres lotes y del total de los ejemplares muestreados, que se ilustra en el Gráfico 2.

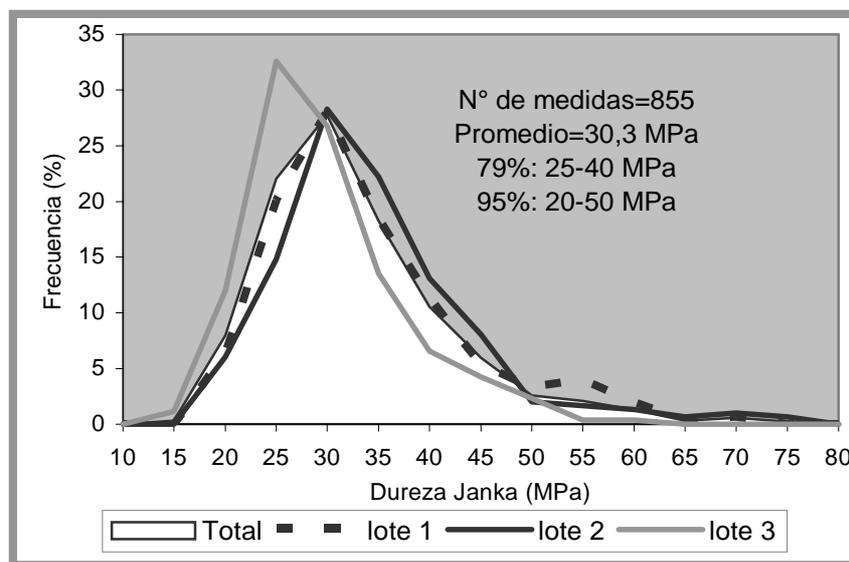


Gráfico 2. Curva de distribución de la dureza Janka de los 3 lotes juntos y por separado

Se realizó la prueba t de Student para comparación de medias con distinta varianza para los valores de dureza Janka con  $\alpha=0,05$  resultando Lote1=Lote2; Lote2≠Lote3; Lote1≠Lote3. De la misma forma que en el caso de la densidad, esta diferencia podría ser atribuible a la variabilidad natural.

Tabla 2. Resumen de resultados de dureza Janka

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Total
N° de medidas	300	297	258	855
Promedio (MPa)	31,4	31,9	27,2	30,3
Desviación estandar (MPa)	9,7	9,6	7,4	9,2
Mínimo (MPa)	15,2	16,5	11,5	11,5
Máximo (MPa)	66,5	75,0	56,7	75,0
CV (%)	31	30	27	30

De acuerdo al intervalo de confianza al 95%, el promedio de la dureza Janka de esta madera será  $(30,3 \pm 0,66)$  MPa.

El intervalo de predicción al 95%, calculado de igual forma que para la densidad, permite prever para madera proveniente del mismo monte, variaciones de la dureza Janka entre 10,9 y 49,7 MPa.

El amplio rango de variación de la dureza Janka y su alto CV sugieren un mejoramiento genético buscando mayor homogeneidad en esta propiedad.

Para la fabricación de algunos productos, como tapas de mesas y pisos, la dureza es uno de los requisitos más importantes. Una alta variabilidad de esta propiedad conduciría a productos de calidad heterogénea. Esto puede ser evitado durante el procesamiento industrial, mediante una clasificación “en línea” de la materia prima en base a la dureza. Esta herramienta contribuiría a lograr uniformidad en la producción.

Mediante mejoramiento genético, seleccionando árboles plus con un rango de variación de dureza más acotado, se minimizaría esta necesidad de clasificación. De todos modos la variación de este indicador en el árbol, si bien no es tan importante como la variación entre árboles de *E.grandis* (Pérez del Castillo, A. 2001), mantendría la necesidad de una clasificación en el proceso industrial.

#### 4.1.3. Color

En el sistema CIELAB, un color queda definido como un punto en el espacio del color, por las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Dichas coordenadas están representadas en los gráficos 3 y 4.

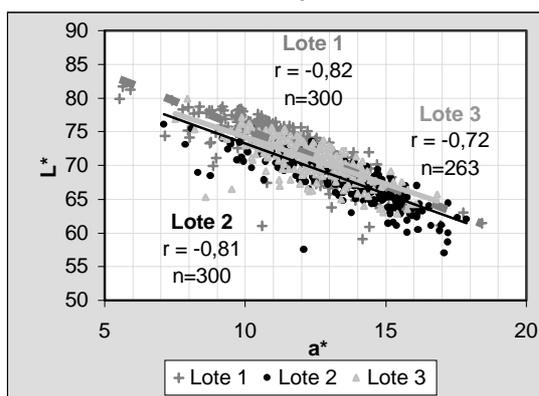


Gráfico 3. Distribución de color de los 3 lotes,  $L^*$  vs.  $a^*$

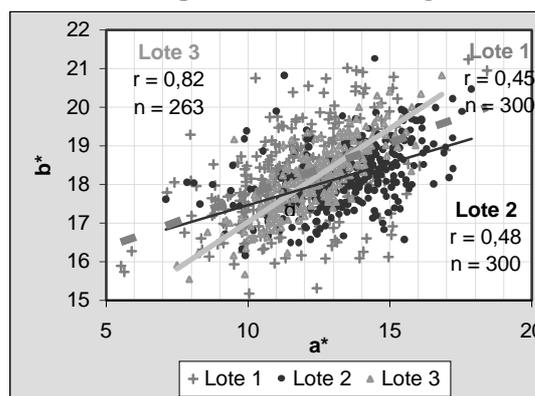


Gráfico 4. Distribución de color de los 3 lotes,  $b^*$  vs.  $a^*$

Nota: En estos gráficos y en los siguientes, n simboliza al número de muestras correlacionadas

Se aprecia la dependencia existente entre las 3 coordenadas que definen al color; si varía una, las otras también lo harán. Esto permitiría seleccionar una única coordenada para los estudios

del color. En este estudio, luego de analizar las distintas coordenadas se seleccionó  $L^*$ , que representa la claridad del color.

Definir el color de una madera es útil para emparejar distintas piezas de una misma especie en el ensamblado de un producto, como ser pisos, muebles, madera laminada y encolada. También permite la comparación objetiva del color de distintas especies, como se muestra en los Gráfico 5 y Gráfico 6.

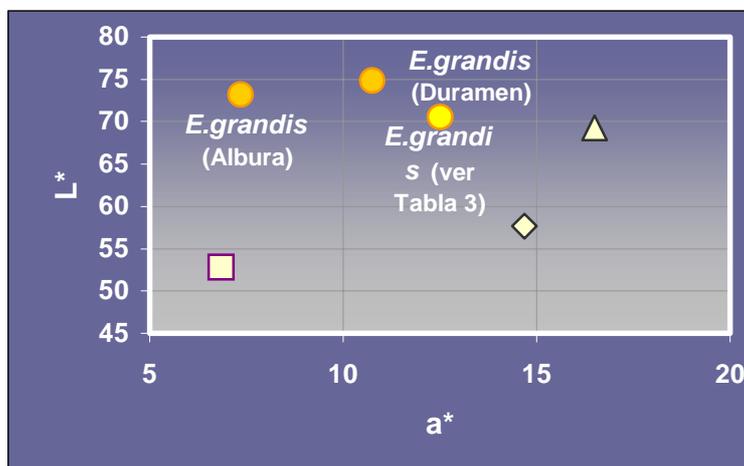


Gráfico 5. Comparación del color de *E.grandis* con otras especies de latifoliadas.  $L^*$  vs.  $a^*$

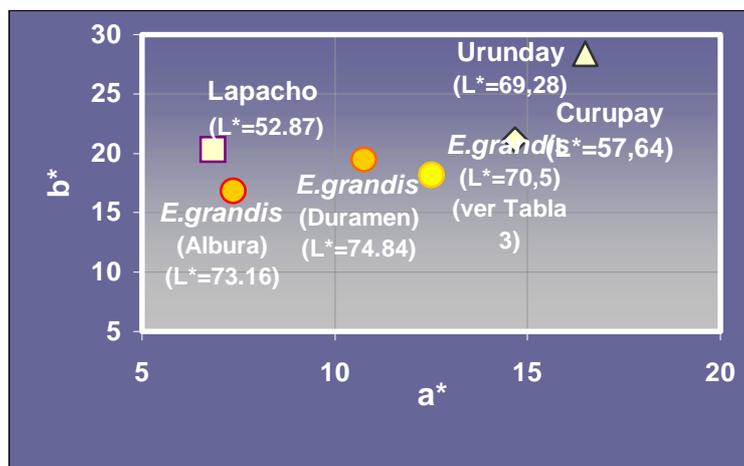


Gráfico 6. Comparación del color de *E.grandis* con otras especies de latifoliadas.  $b^*$  vs.  $a^*$

Nota: Los otros valores de madera de Lapacho, Curupay, Urunday, *E.grandis* (duramen) y *E.grandis* (albura), que figuran en estas gráficas, corresponden a medidas realizadas en el LATU en otros estudios.

Las maderas de Lapacho, Curupay y Urunday, importadas de Brasil y Paraguay, son muy aceptadas comercialmente en el mercado nacional, siendo usadas para pisos y aberturas, entre otros usos.

De estos gráficos se aprecia que la madera de *E.grandis* es más clara que la de las otras tres, siendo la de Lapacho la más oscura. La de *E.grandis* es más rojiza que la de Lapacho, mientras que la de Urunday y la de Curupay lo son aún más. Observando el eje  $b^*$  se distingue el Urunday por el tono amarillento de su madera.

Comparando los colores de la madera del duramen y de la albura de *E.grandis*, la principal diferencia parece ser el tono rojizo más intenso y algo más amarillo del duramen, mientras que  $L^*$  es muy parecida en ambos casos.

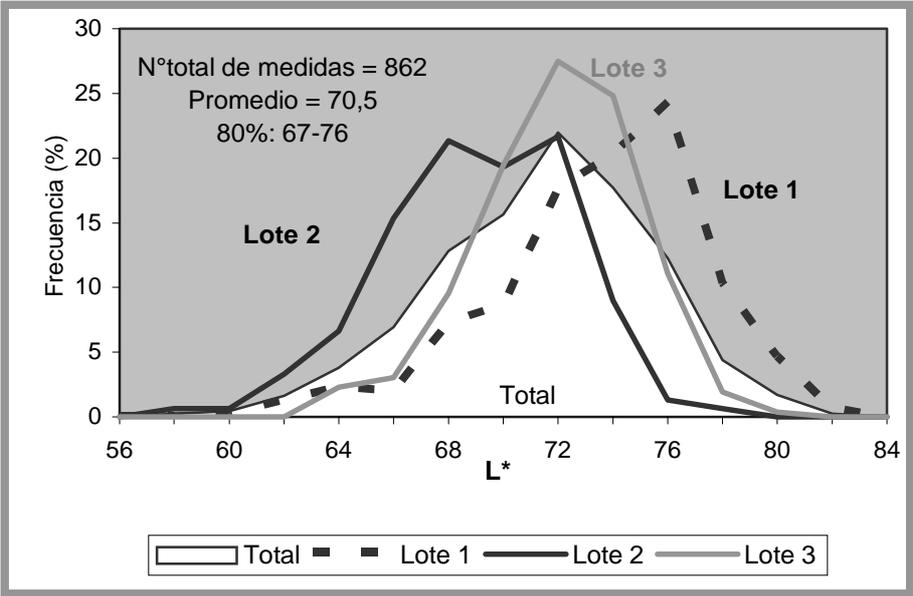


Gráfico 7. Curva de distribución de  $L^*$  de los 3 lotes juntos y por separados

Se detectaron diferencias significativas lote a lote según la prueba t de Student. Esto indicaría alguna posible fuente de variación entre lotes que afecta el color pero que no ha podido ser detectada. De todos modos, por la forma aleatoria en que se realizó el muestreo, es posible considerar al conjunto de los ejemplares de ensayo como integrantes del universo de la muestra, independientemente del factor temporal (distintos lotes).

La luminosidad ( $L^*$ ) se extiende en un rango total de 57 a 82 y el 80% de los valores se pueden ubicar entre 67 y 76.

Mediante un cálculo de la varianza muestral similar al de los casos anteriores se puede estimar un intervalo de predicción al 95% de 58 a 83, para los valores  $L^*$  de cualquier elemento proveniente de la muestra estudiada.

La enorme variación del color entre piezas de una misma partida afectaría la estética del producto final de no hacerse una clasificación previa de la materia prima por color. Dada las preferencias habituales de los consumidores en cuanto a la homogeneidad del color, sería deseable disminuir esta heterogeneidad por clasificación en la planta industrial, o bien por mejoramiento genético.

Tabla 3. Resumen de resultados de color - L\*a\*b\*

	Lote 1			Lote 2			Lote 3			Total		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N° de medidas	300	300	300	300	300	300	262	263	263	862	863	863
Promedio	72,52	11,72	18,18	68,11	13,47	18,22	71,00	12,32	18,15	70,53	12,51	18,19
Desviación estandar	3,87	1,92	1,15	3,37	1,81	0,83	2,88	1,51	0,89	3,89	1,91	0,97
Mínimo	59,12	5,53	15,18	56,98	7,11	16,16	62,83	7,51	15,55	56,98	5,53	15,18
Máximo	81,66	18,42	21,24	76,10	17,88	21,25	79,85	16,83	20,82	81,66	18,42	21,25
CV (%)	5,3	16	6,3	4,9	13	4,6	4,1	12	4,9	5,5	15	5,3

El a\* representa la escala que va del verde (para valores negativos) al rojo (para valores positivos). Para este parámetro se observó una variabilidad mayor que para el b\* (que va del azul al amarillo) y también mayor que para el L\*. Esto se ve numéricamente en el coeficiente de variación de 15%.

La apreciación del color es subjetiva y las preferencias por distintas tonalidades o luminosidades dependen de muchos factores como la moda y los gustos personales. Pero sí es casi generalizada la preferencia por la homogeneidad en el color. Si bien es sabido que puede haber influencia del sitio en el color de la madera, y por lo tanto son muy cuestionables los resultados que se puedan obtener, es un reto para el campo de la genética en el área forestal, la disminución de la variabilidad del color, especialmente de a\*, cuyo CV es el mayor.

#### 4.1.4. Penetración por Pilodyn

Tabla 4. Resumen de resultados de penetración por Pilodyn

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Total
N° de medidas	300	300	263	863
Promedio (mm)	10,6	10,4	11,4	10,7
Desviación estándar (mm)	2,0	1,9	2,1	2,0
Mínimo (mm)	6	5	7	5
Máximo (mm)	16	16	20	20
CV (%)	19	19	18	19

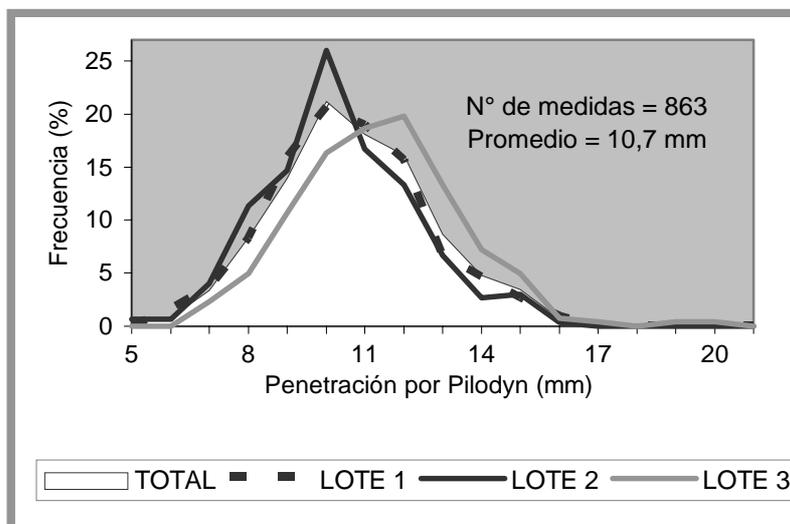


Gráfico 8. Distribución de penetración por Pilodyn de los 3 lotes juntos y por separado

De acuerdo a la prueba t de Student, los lotes 1 y 2 presentan igual magnitud de penetración por Pilodyn, mientras que el promedio del lote 3 es diferente. Este resultado coincide con los de dureza y densidad, reflejando el vínculo existente entre estas propiedades.

## 4.2. RELACIONES ENTRE INDICADORES

### 4.2.1. Dureza Janka y densidad

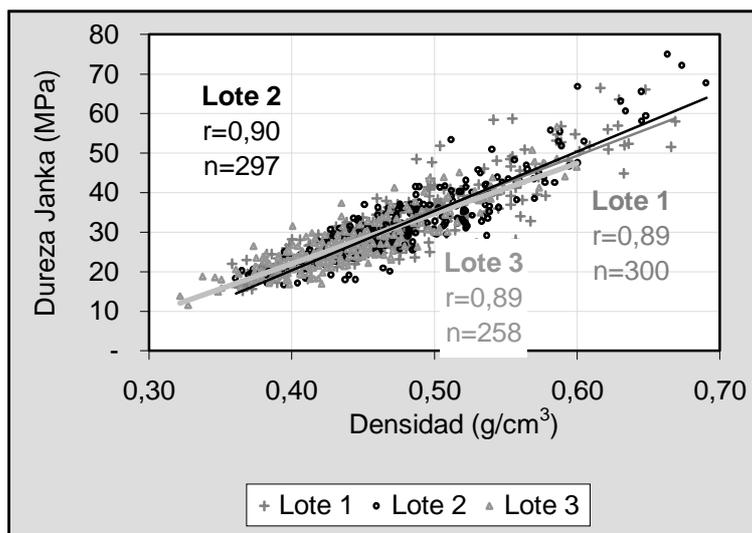


Gráfico 9. Dureza Janka vs. densidad

Se estudió la relación entre la densidad y la dureza Janka para cada uno de los 3 lotes por separado debido a que según la prueba t de Student, existe diferencia significativa entre los lotes estudiados.

El coeficiente de correlación obtenido para cada uno de los 3 lotes es suficientemente alto como para suponer que existe una dependencia lineal entre la dureza Janka y la densidad.

Es muy probable que las tres rectas de regresión se puedan asimilar a una sola, lo que significaría que independientemente del lote muestreado, la relación entre la densidad y la dureza Janka se mantendría. Para verificar este supuesto se realizó la siguiente prueba:

A partir de valores de densidad entre 0,32 y 0,68 g/cm<sup>3</sup> se calcularon los valores de dureza Janka correspondientes con cada una de las tres ecuaciones de correlación obtenidas. Estos valores de dureza fueron comparados entre sí a través de pruebas t de Student para muestras emparejadas. El resultado fue que la relación existente entre la dureza Janka y la densidad es la misma para los tres lotes.

Es posible usar entonces una correlación obtenida a partir de todas las muestras juntas (sin distinguir entre lotes). La siguiente ecuación corresponde al modelo de regresión lineal:

$$D = 138,59 d - 33,917 \quad \text{con } r = 0,90$$

Donde:

D = dureza Janka (MPa)

d = densidad (g/cm<sup>3</sup>)

En la Gráfica 10 se muestra esta correlación junto con dos límites de predicción para el modelo; dentro de estos límites deberían caer el 95% de los valores de dureza estimados a partir de la densidad según el modelo propuesto.

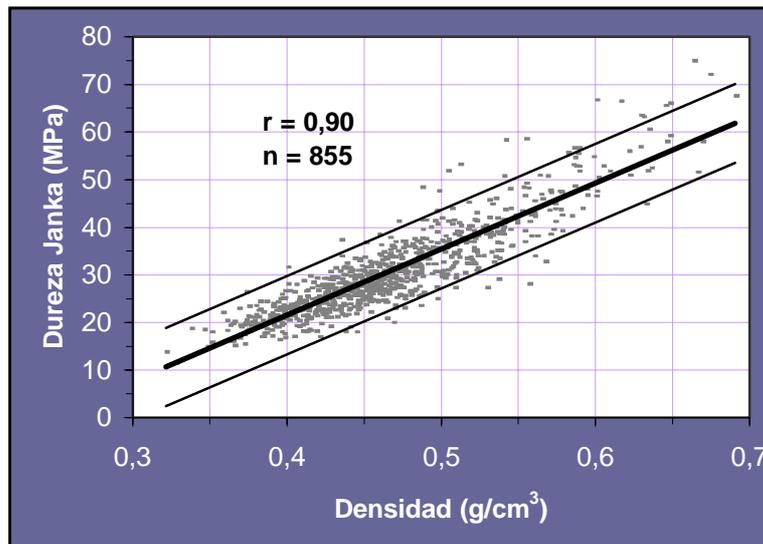


Gráfico 10. Estimación de dureza en función de la densidad

Con anterioridad se han encontrado buenas correlaciones para numerosas especies (Forest Products Laboratory, 1990). En este caso con un  $r=0,90$ , es posible afirmar que existe alta probabilidad de hacer estimaciones de la dureza mediante medidas en la densidad.

La densidad es un indicador de calidad que ha revelado alta heredabilidad para el *E.grandis*. (Downes, G. M. *et al.* 1997 y Malan, F. S. 1991). Acerca de la heredabilidad de la dureza no hay muchos estudios. Sin embargo la alta correlación existente entre ambas permitiría predecir el comportamiento de la dureza.

La densidad puede utilizarse entonces como indicador de calidad de la madera en lugar de la dureza Janka, que es más difícil de medir. Especialmente en el área del mejoramiento genético, se deben hacer numerosas medidas de los indicadores usados como criterio de selección. Se deben evaluar muchos individuos, y también se debe conocer el comportamiento en altura y en el radio del árbol. Para la medida de la dureza se necesita una máquina universal de ensayos que permita penetrar la madera a una velocidad determinada y constante, y medir la fuerza efectuada con la precisión requerida. Es un equipo costoso y el ensayo relativamente trabajoso. Para la medida de la densidad sólo se necesita una balanza de precisión y una estufa a temperatura controlada. Por otra parte en este caso las muestras pueden ser extraídas con un calador de tarugos sobre el árbol en pie y de esta forma es factible evaluar su calidad sin apearlo (O'Neill, H., 2001).

Por las mismas razones de índole práctico mencionadas arriba, acerca de la evaluación de la dureza, es aconsejable la búsqueda de métodos indirectos para su medición en otros campos, como ser en el procesamiento industrial de la madera. Desde este punto de vista la correlación hallada entre dureza y densidad habilita a clasificar la materia en base su densidad, para obtener indirectamente una clasificación por la dureza.

#### 4.2.2. Color y densidad

Si bien cada sistema define perfectamente la posición del sustrato medido en el espacio del color, distintos sistemas de coordenadas arrojan la misma información pero bajo diferente forma. Esto permitirá seguir diferentes caminos al rastrear la influencia de la densidad en el color. Es decir, interesa saber si mayor densidad redonda en menor luminosidad o en una intensificación del color (cromaticidad), o en cambio el efecto puede ser mayor en la escala de los rojos, por ejemplo.

Se estudió la variación de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $H^*$  y  $\Delta E^*$  (diferencia total de color entre dos puntos) con la densidad, hallándose una mejor correlación en el caso de  $L^*$ , que se ilustra a continuación.

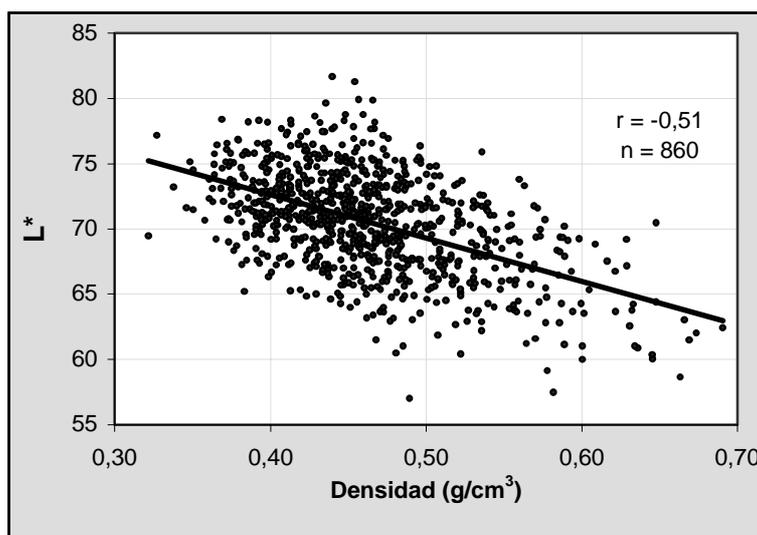


Gráfico 11.  $L^*$  vs. Densidad

Se verifica una tendencia general descendente de la luminosidad con la densidad. Del estudio de los residuales del modelo lineal, se puede deducir que existe una relación lineal entre ambos indicadores, a pesar de la gran dispersión de los puntos denunciada por el valor del coeficiente de correlación.

Dada la alta dispersión de los valores se analizó la dependencia de la densidad con más de una coordenada del color, investigándose una posible relación de los residuales de la curva densidad vs.  $L^*$  con las otras coordenadas del color. Como resultado se descartó una múltiple dependencia, pudiéndose afirmar que  $L^*$  es la mejor coordenada del color para estimar la densidad.

Esta correlación promete una posible clasificación indirecta por densidades a través de una selección visual por categorías de color en el aserradero.

Esto implica, de acuerdo a lo ya visto, que seleccionando según la luminosidad de la madera, sería posible separar distintas categorías de densidad y por lo tanto también de dureza.

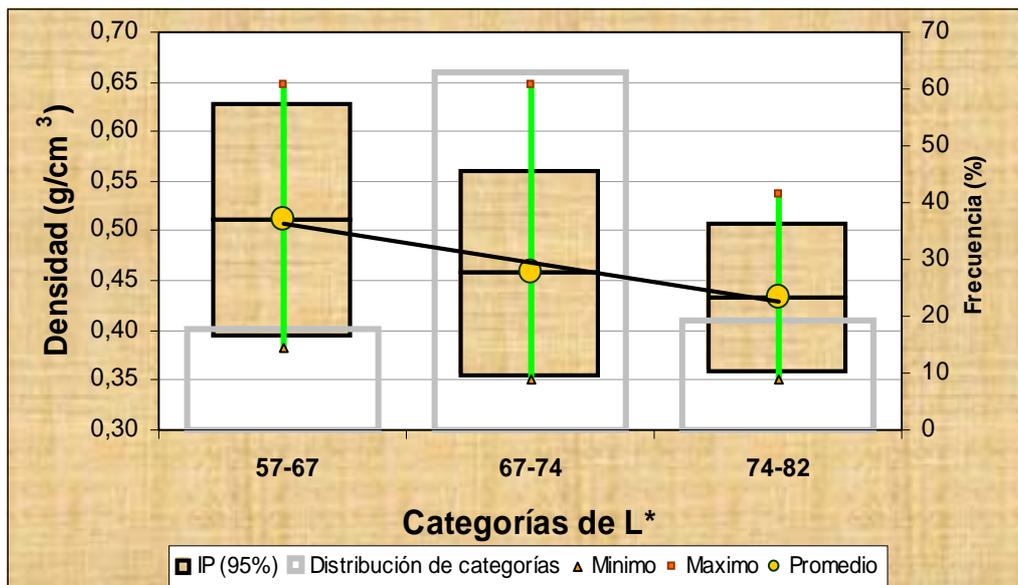


Gráfico 12. Intervalo de predicción al 95% para la densidad en tres categorías de L\*

En la Gráfica 12 se separaron las probetas en tres categorías de L\* que fueron elegidas arbitrariamente. Se evaluó la separación obtenida para los valores de densidad, a través de los promedios por categoría, los rangos de variación, los coeficientes de variación (CV) y los intervalos de predicción al 95% para cada categoría.

Como primer resultado de esta clasificación, se obtiene obviamente mayor homogeneidad en el color de los productos realizados con madera proveniente de una misma categoría.

En segundo lugar, se separan distintos rangos de densidades. Si bien la separación obtenida para la densidad no sería total, mejoraría la homogeneidad dentro de cada grupo. Esto se ve en la disminución del CV. El CV de la densidad de toda la muestra es 13%, mientras que el de las nuevas clases varía de 9 a 11%. En cuanto al CV de la dureza Janka, disminuyó desde un 30% a valores entre 21 y 27% para estas categorías.

Debido a que la percepción del color es subjetiva, sería un punto a investigar la capacidad del ojo humano de separación de categorías y evaluar los resultados efectivamente obtenidos para cada categoría luego de una clasificación visual hecha por el personal en la industria.

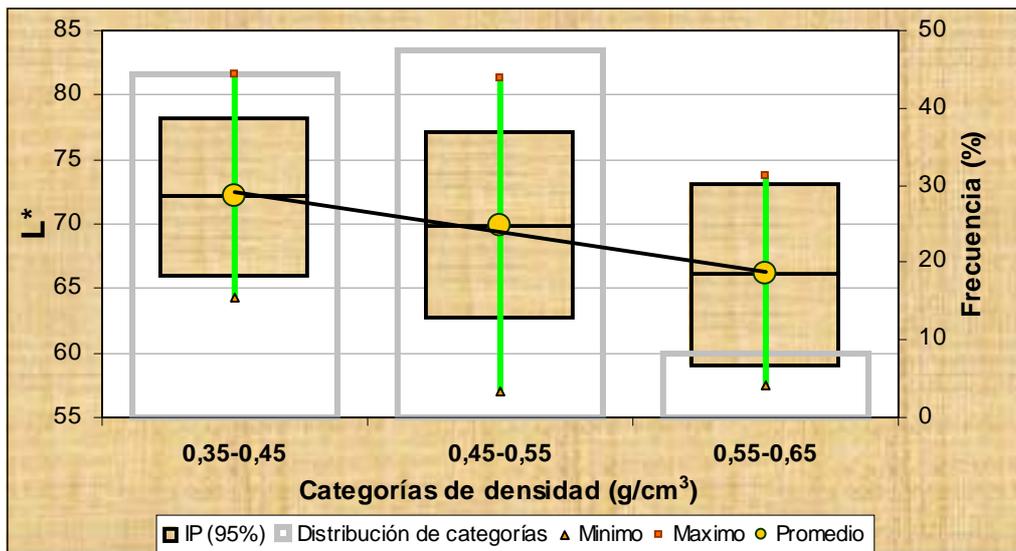


Gráfico 13. Intervalo de predicción al 95% para L\* en tres categorías de densidad

En la gráfica 13, se analizó el mismo fenómeno desde otro punto de vista. Ya que al momento no se ha determinado la capacidad de separación del ojo humano, se clasificaron las probetas por su densidad y se analizaron las categorías obtenidas en cuanto a su L\* (promedio, rango de variación, CV, IP al 95%).

Si bien la separación obtenida entre categorías no es total, se aprecia una diferencia entre promedios e intervalos de predicción.

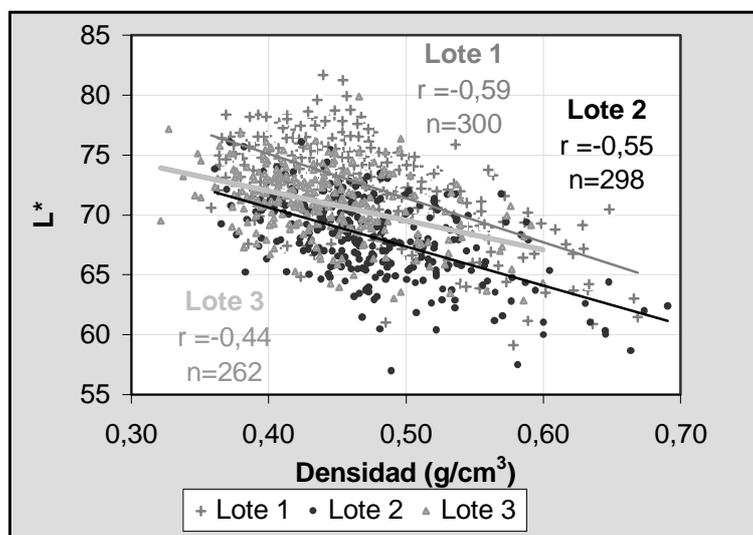


Gráfico 14. Densidad vs. L\* para cada uno de los tres lotes

Si se analizan los 3 lotes por separado se encuentran 3 curvas diferentes. Esto se debe probablemente a la influencia de algún factor que varía entre lotes y que no se ha podido determinar en este estudio.

En el caso del color, al comparar las medias de L\* para los 3 lotes, los resultados no coincidieron exactamente con los de densidad y dureza. Esto puede denotar otros factores afectando al color de la madera.

No se puede asegurar la mejora conjunta del color con las otras propiedades mediante mejoramiento genético debido a la influencia que tiene el sitio en esta propiedad. Es confusa la influencia de la genética en el color; la heredabilidad del color del duramen es compleja de

determinar. Otros estudios, en los que se analicen todos los posibles factores que afectan el color, son necesarios para determinar si es posible usar al color como parámetro en el mejoramiento genético de *Eucalyptus grandis*.

#### 4.2.3. Pilodyn y densidad - Pilodyn y dureza Janka

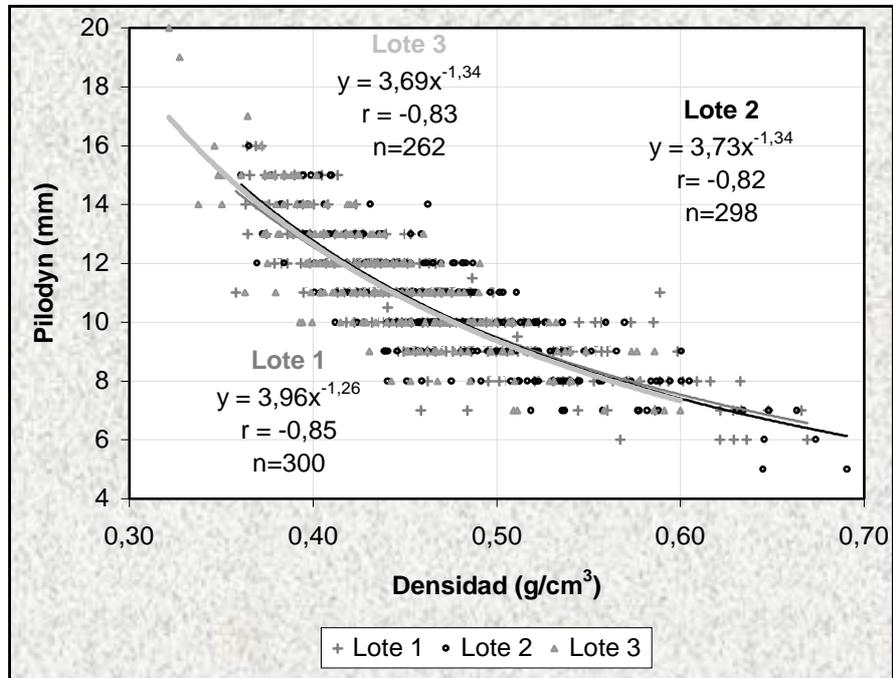


Gráfico 15. Pilodyn vs. Densidad

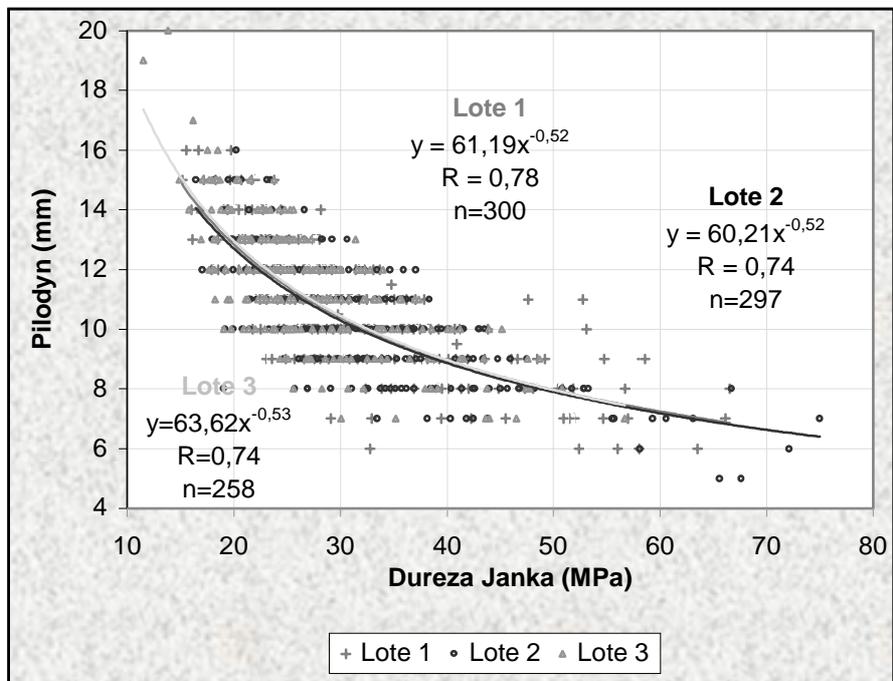


Gráfico 16. Pilodyn vs. dureza Janka

La penetración del Pilodyn correlacionó según una relación potencial con la densidad ( $r = -0,84$ ) y con la dureza Janka ( $r = -0,77$ ). Se necesitan numerosas medidas para construir una curva de regresión; estas correlaciones se obtuvieron a partir de 860 y 855 medidas de densidad y dureza respectivamente, obteniéndose una relación confiable para la muestra estudiada.

Iguales variaciones de densidad o de dureza provocarán diferente cambio en la profundidad de penetración con el Pilodyn dependiendo del rango de trabajo; a menor densidad de la madera, la sensibilidad de la medida del Pilodyn será mayor.

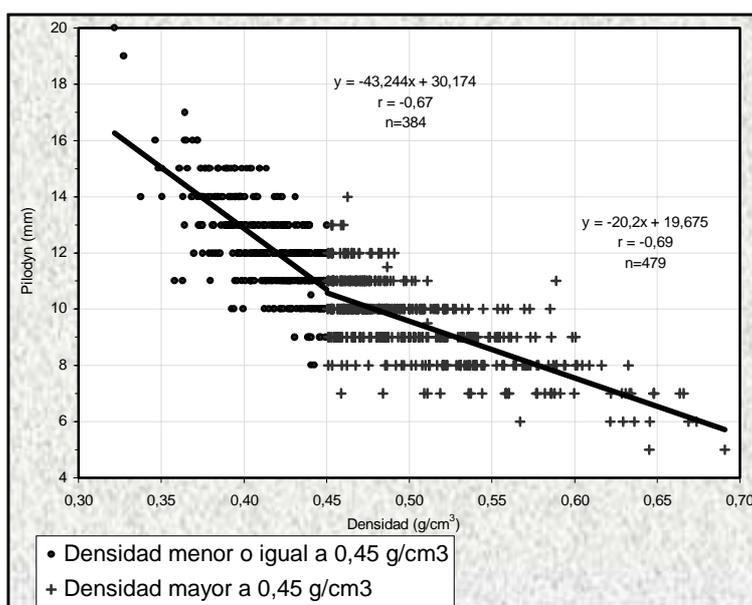


Gráfico 17. Pilodyn vs. Densidad. Correlación para dos rangos de densidad

Para simplificar la aplicación práctica del Pilodyn, se proponen 2 rangos de trabajo: uno para densidades hasta 0,45 g/cm<sup>3</sup> y otro para densidades mayores a 0,45 g/cm<sup>3</sup> (próximo al promedio). En ambos intervalos de densidad, se puede utilizar regresiones lineales que simplifican el trabajo práctico y requieren de menor cantidad de puntos para ser construidas. Teniendo en cuenta que con el Pilodyn las lecturas tienen una apreciación de 1 mm, es muy importante la sensibilidad del método. El hecho de que a densidades menores, la sensibilidad del método sea más alta, y por lo tanto el mismo cambio en la densidad provoque mayores variaciones en la profundidad de penetración, implica que en el rango de menores densidades las medidas del Pilodyn sean más aceptables. La incertidumbre esperada para el rango de mayores densidades será entonces mayor.

El Pilodyn es un equipo portátil, que puede ser llevado al monte, y cuya operación es sencilla. A través de medidas simples y rápidas con Pilodyn se pueden estimar valores de densidad y de dureza. Sin embargo es necesario estudiar la relación entre las medidas realizadas sobre la madera seca y sobre la madera en condición verde. De la misma forma, es preciso analizar la relación entre la penetración del Pilodyn efectuada inmediatamente debajo de la corteza, sobre el árbol en pie, y la penetración promedio en el duramen.

Ésta sería una gran herramienta para la selección de árboles plus para mejoramiento genético.

#### 4.3. EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE UNA MADERA DE ACUERDO AL USO FINAL

Uno de los usos de la madera de *E.grandis* es para la fabricación de pisos. Existen varios requisitos de calidad para la madera utilizada con este destino: dureza, resistencia a la flexión (sobre todo en el caso de pisos flotantes), estabilidad dimensional y resistencia a la abrasión. En este trabajo se estudió la dureza Janka de árboles de *Eucalyptus grandis* provenientes de un mismo monte, y se comparó con la de otras especies comerciales.

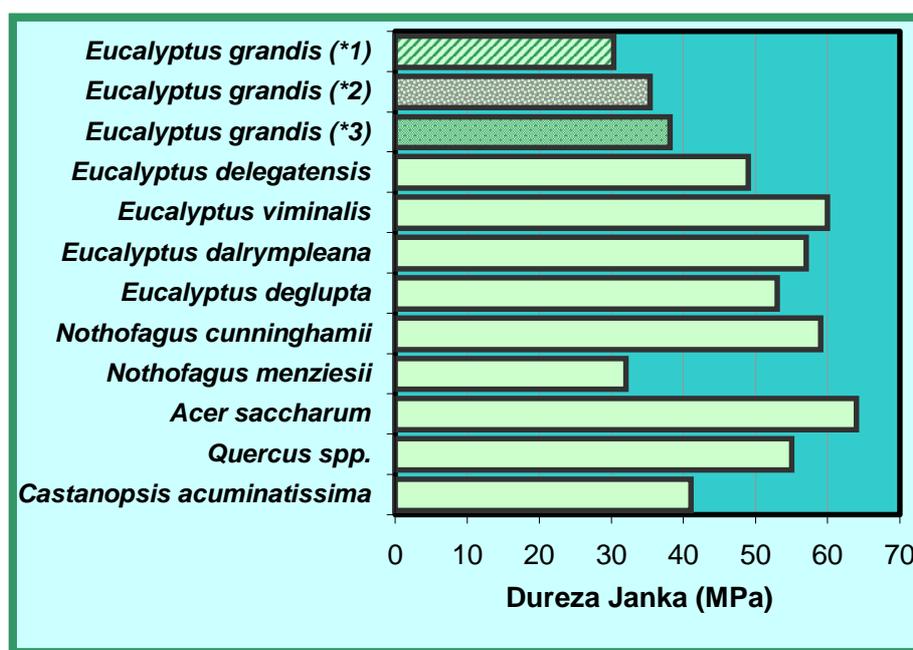


Gráfico 10. Comparación de dureza Janka (en cara tangencial) de *E.grandis* de Uruguay, obtenida en este y en otros estudios, con otras especies comerciales que se usan actualmente para pisos

Notas:

- ♣ (\*1) Datos correspondientes a este estudio
- ♣ (\*2) Datos extraídos de Mantero Álvarez, C., 1999. Corresponden a 5 árboles muestreados en distintos lugares del país
- ♣ (\*3) Datos extraídos de Pérez del Castillo, A., 2001. Corresponden a 10 árboles plus (seleccionados por fenotipo) del departamento de Rivera.
- ♣ El resto de los datos fueron extraídos de Bootle, K. R., 1983

Según las normas australianas (A.S. N° 0.71-1960), *E.grandis* es una de las especies aceptadas para pisos de parquet. La madera de *E.grandis* proveniente de Uruguay se usa con buenos resultados para la fabricación de pisos domésticos. Sin embargo, para usos más exigidos (locales comerciales, oficinas, etc.) la dureza Janka debería ser mayor a la obtenida en este trabajo. En estos pisos los tacos de los zapatos femeninos y las patas de muebles pueden dejar marcas. También sufren mayor desgaste, por lo que la resistencia a la abrasión comienza a jugar un papel importante. No obstante, el acabado superficial le confiere la resistencia a la abrasión. Para estos usos se debería seleccionar la materia prima de mayor dureza.

Es de esperar que un aumento de la dureza Janka a valores del orden de 40 a 45 MPa, mejoraría sustancialmente el comportamiento de la madera frente a agentes incrustantes. De

acuerdo a la correlación arriba obtenida, esto implicaría, para estos usos finales, utilizar madera con densidades, entre  $0,53 \text{ g/cm}^3$  y  $0,57 \text{ g/cm}^3$ .

Hoy en día en distintas partes del mundo se están desarrollando técnicas para el mejoramiento superficial de la madera, tales como endurecimiento superficial por compresión, impregnación con plásticos o aplicación de distintos acabados superficiales. No obstante, el mejoramiento genético sigue siendo la única manera de modificar la materia prima sin necesidad de encarecer el proceso industrial. Para esto se debería seleccionar de árboles plus cuya madera tenga densidades entre  $0,53 \text{ g/cm}^3$  y  $0,57 \text{ g/cm}^3$ .

No se debe olvidar que el adecuado manejo forestal es también un paso importante en la obtención de madera de calidad. Por lo tanto, también al planificar de manejo forestal, se debe tener en cuenta cuál es la calidad final requerida.

## **5. CONCLUSIONES**

1. La densidad promedio hallada para la madera de *E. grandis* del monte muestreado es de  $0,463 \text{ g/cm}^3$ , mientras que la dureza Janka promedio encontrada es de 30,3 MPa.
2. La variabilidad en la dureza Janka es suficientemente grande como para que sea recomendable una categorización en el procesamiento industrial.
3. El rango de variación del color es también muy amplio, sugiriéndose separar las piezas por color para mejorar el aspecto estético del producto final.
4. Se ha encontrado una dependencia lineal entre las coordenadas del color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , permitiendo trabajar con una sólo coordenada en los estudios de color.
5. Es posible clasificar la madera de *E.grandis* de acuerdo a la claridad de su color y así obtener una mejora en la homogeneidad de la densidad y la dureza para cada categoría.
6. Se sugiere profundizar estos estudios para analizar al color como un indicador de calidad de la madera de *E.grandis*.
7. El Pilodyn promete ser una herramienta confiable para estimación de la dureza y la densidad. Es necesario estudiar la relación entre la penetración realizada sobre madera seca de duramen con el ensayo sobre el árbol en pie, ya que éste sería el método no destructivo para evaluar densidad y dureza, más fácilmente aplicable tanto para mejoramiento genético, como para manejo forestal.
8. La sensibilidad de las medidas con el Pilodyn es mayor para maderas menos densas, sugiriéndose para aplicaciones prácticas, un modelo lineal como correlación entre Pilodyn y densidad o Pilodyn y dureza. Se recomienda aplicarlo en dos rangos de densidad por separado, para bajas y altas densidades. Se espera mayor confiabilidad del método para menores densidades.
9. Es probable que para *Eucalyptus grandis* la dureza sea un índice de calidad de alta heredabilidad.
10. La dureza Janka y la densidad del *E.grandis* están íntimamente relacionadas, permitiendo la manipulación conjunta de ambas propiedades mediante un mejoramiento genético. Es posible entonces, usar la densidad como indicador de calidad de la madera en lugar de la dureza Janka.
11. Si bien la madera de plantaciones de *E.grandis* en Uruguay se industrializa actualmente con buenos resultados, mediante un aumento en la densidad, la dureza y la homogeneidad, se le promovería para usos más exigentes.
12. La variabilidad encontrada en la densidad (y también en la dureza Janka) permitiría la selección de especímenes con densidades sensiblemente mayores al promedio, para utilizar para mejoramiento genético.

13. Estos resultados sugieren un mejoramiento genético y un manejo forestal enfocado a la calidad considerando los usos finales, para permitir destinar la madera de *E.grandis* a productos con mayor valor agregado.
14. Si bien las conclusiones arriba expuestas se refieren exclusivamente a un sólo monte, son optimistas en cuanto a las posibilidades de aumentar la calidad de la madera de *E.grandis* por mejoramiento genético.
15. En la evaluación de los resultados obtenidos, es necesario tener en cuenta que este trabajo se realizó sobre madera proveniente de un sólo monte del departamento de Rivera. Se sugiere extender estos estudios con otros muestreos en distintas regiones del país.

## **6. REFERENCIAS**

Bootle Keith, R., 1983. Wood in Australia. Types, properties and uses. McGraw-Hill Book Company. Part Two

Downes, G.M.; Hudson, I.L.; Raymond C.A.; Dean G.H.; Michell A.J.; Schimleck L.R.; Evans R. and Muneri A., 1997: Sampling Plantation. Eucalypts for wood and fibre properties. CSIRO Publishing

Forest Products Laboratory (United States Department of Agriculture), 1990. Wood Engineering Handbook. Second edition. Pp4-25, 4-28

Malan, F.S., 1991: Variation, Association and Inheritance of Juvenile Wood Properties of *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) with Special Reference to the effect of Rate of Growth. South African Journal of Forestry 157.

Mantero Alvarez, C. 1999: Propiedades físicas y mecánicas de los Eucaliptos : *E. grandis*; *E. globulus*; *E. tereticornis* . Uruguay Forestal, 9 (21) : 13-16.

Montgomery, D. C. 1991: Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica.

O'Neill, H. 2001: Métodos de ensayo no destructivos para la evaluación de las propiedades mecánicas y fundamentales de la madera. Presentación poster en el Simposio Internacional IUFRO (División 2). Desarrollando el eucalipto del futuro. Setiembre, 2001, Chile.

Pérez del Castillo, A. 2001: Propiedades Mecánicas y Calidad de la Madera de *Eucalyptus grandis* de Rivera, Uruguay. Informe de Investigación N°4. LATU-JICA. Montevideo, Uruguay.

Standards Association of Australia: Australian Standard Specification for wood blocks for parquet flooring A.S N°071-1960

**Laboratorio Tecnológico del Uruguay**  
**Sector Productos Forestales**  
Av. Italia 6201- CP. 11500-Montevideo, Uruguay  
Tel. (+598-2)601.3724 Int. 321 Fax:(+598-2)601.8554  
e-mail: [sbothig@latu.org.uy](mailto:sbothig@latu.org.uy)  
[rdecas@latu.org.uy](mailto:rdecas@latu.org.uy)