

T 2009 /



UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMIA

EVALUACION DE PROPIEDADES DE LA MADERA EN CLONES  
DE *Eucalyptus grandis* HILL (EX MAIDEN).

por

Luis Augusto ACHUGAR LAGUARDIA  
Gustavo SCAGLIONE SANSON

FACULTAD DE AGRONOMIA  
UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
BIBLIOTECA

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2003

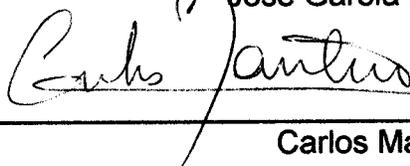
Tesis aprobada por:

Director:



---

José García De León



---

Carlos Mantero



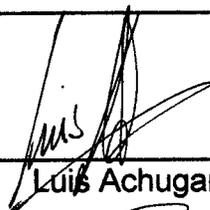
---

Jorge Franco

Fecha:

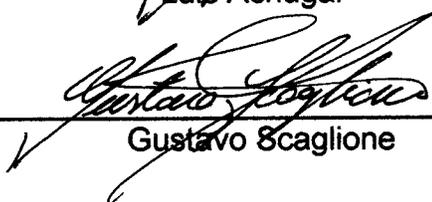
---

Autor:



---

Luis Achugar



---

Gustavo Scaglione

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su profundo agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo. En especial al Departamento Forestal de la Facultad de Agronomía; al Ing. Agr. Carlos Mantero, por su continua colaboración en todo este proceso; al Dr. Jorge Franco, por su invaluable apoyo en la fase de procesamiento de los datos. A la empresa COFOSA, especialmente al MSc. José García de León por brindarnos la posibilidad de realizar este estudio y al Ing. Agr. Carmelo Centurión, por su colaboración en la recolección del material experimental.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACION.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IV
<b><u>1 INTRODUCCION</u></b> .....	<b>1</b>
<b><u>2 REVISION BIBLIOGRAFICA</u></b> .....	<b>3</b>
2.1 DENSIDAD BASICA.....	3
<u>2.1.1 Características generales</u> .....	3
<u>2.1.2 Variación con la edad</u> .....	5
<u>2.1.3 Variación dentro del árbol</u> .....	6
2.1.3.1 Variación axial o longitudinal.....	6
2.1.3.2 Variación radial.....	8
2.1.3.3 Interacción entre la variación radial y longitudinal.....	10
<u>2.1.4 Variación entre árboles</u> .....	11
2.1.4.1 Variación genética.....	12
2.1.4.1.1 Variación entre especies del género Eucalyptus.....	12
2.1.4.1.2 Variación entre procedencias.....	13
2.1.4.1.3 Variación entre familias.....	14
2.1.4.2 Estimaciones de Heredabilidad.....	15
2.1.4.3 Sitio, tratamientos silviculturales y tasa de crecimiento.....	16
2.1.4.3.1 Sitio.....	16
2.1.4.3.2 Espaciamiento.....	17
2.1.4.3.3 Tratamientos silviculturales.....	18
2.1.4.3.4 Tasa de crecimiento.....	19
2.2 LONGITUD DE FIBRA.....	23
<u>2.2.1 Características generales</u> .....	23
<u>2.2.2 Variación con la edad</u> .....	24
<u>2.2.3 Variación dentro del árbol</u> .....	24
2.2.3.1 Dentro del anillo de crecimiento.....	24
2.2.3.2 Variación radial.....	25
2.2.3.3 Variación longitudinal.....	26
<u>2.2.4 Variación entre árboles</u> .....	26
2.2.4.1 Variación genética.....	27
2.2.4.2 Estimaciones de Heredabilidad.....	28
2.2.4.3 Sitio, tratamientos silviculturales y tasa de crecimiento.....	28
2.2.4.3.1 Sitio.....	28
2.2.4.3.2 Tratamientos silviculturales.....	29

2.2.4.3.3 Tasa de crecimiento .....	30
2.2.5 <u>Correlación con la Densidad Básica</u> .....	31
2.3 METODOS DE MUESTREO .....	32
2.3.1 <u>Pilodyn</u> .....	33
2.3.2 <u>Determinación del punto óptimo de muestreo</u> .....	35
<b>3 <u>MATERIALES Y METODOS</u></b> .....	<b>37</b>
3.1 MATERIALES .....	37
3.1.1 <u>Instrumentos</u> .....	37
3.1.2 <u>Características del sitio y del material experimental</u> .....	37
3.1.2.1 Características climáticas.....	38
3.1.2.2 Características edáficas y geológicas.....	38
3.1.2.3 Características de los ensayos y del material leñoso .....	39
3.2 METODOS .....	41
3.2.1 <u>Obtención del material leñoso</u> .....	41
3.2.2 <u>Trabajo de laboratorio</u> .....	42
3.2.2.1 Determinación de la Densidad Aparente Básica.....	42
3.2.2.2 Determinación del Largo de fibra .....	44
3.2.3 <u>Procesamiento de los datos</u> .....	46
3.2.3.1 Determinación de los valores promedio .....	47
<b>4 <u>RESULTADOS</u></b> .....	<b>49</b>
4.1 DENSIDAD BASICA.....	49
4.1.1 <u>Variación entre clones y edades</u> .....	49
4.1.2 <u>Variación de la densidad básica con la altura</u> .....	51
4.1.3 <u>Variación en el radio</u> .....	55
4.1.4 <u>Resultados obtenidos utilizando el Pilodyn</u> .....	58
4.1.5 <u>Punto óptimo de muestreo</u> .....	61
4.2 LARGO DE FIBRA.....	63
4.2.1 <u>Variación con la edad</u> .....	63
4.2.2 <u>Variación con la altura</u> .....	65
4.2.3 <u>Variación radial</u> .....	68
4.3 CORRELACION ENTRE DENSIDAD BASICA Y LONGITUD DE FIBRA.....	71
<b>5 <u>DISCUSION</u></b> .....	<b>74</b>
5.1 DENSIDAD BASICA.....	74
5.1.1 <u>Fuentes de Variación</u> .....	74
5.1.2 <u>Pilodyn</u> .....	76
5.1.3 <u>Punto óptimo de muestreo</u> .....	77
5.2 LONGITUD DE FIBRA.....	78
5.2.1 <u>Fuentes de Variación</u> .....	78
5.3 CORRELACION ENTRE DENSIDAD BASICA Y LONGITUD	

DE FIBRA.....	79
<b><u>6 CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>81</b>
<b><u>7 RESUMEN</u></b> .....	<b>83</b>
<b><u>8 SUMMARY</u></b> .....	<b>84</b>
<b><u>9 BIBLIOGRAFIA</u></b> .....	<b>85</b>
<b><u>10 ANEXOS</u></b> .....	<b>93</b>

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

CUADRO N°	Página
1. Distribución de las Precipitaciones (mm) durante el período de crecimiento de los ensayos.....	38
2. Descripción de los Ensayos donde se realizó el muestreo .....	39
3. Densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para el clon X9 en función de la edad .....	49
4. Densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para el clon X34 en función de la edad.....	50
5. Estimadores de los modelos de regresión de la densidad básica en función de la altura por clon según la edad.....	52
6. Densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para las diferentes alturas de muestreo por clon según la edad.....	53
7. Coeficiente de correlación entre la densidad básica ( $\text{g/cm}^3$ ) y Pilodyn (mm) por clon según la edad.....	55
8. Densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para las tres zonas de muestreo en la base y al DAP por clon según la edad.....	58
9. Coeficiente de correlación entre la densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) y Pilodyn (mm) medido al DAP por clon según la edad.....	60
10. Coeficiente de correlación entre la densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) por zona y penetración del Pilodyn (mm) para ambos clones.....	61
11. Puntos óptimos de estimación y niveles de correlación de la densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) del árbol.....	62
12. Puntos óptimos de determinación de la penetración del Pilodyn en función del nivel de correlación con la densidad básica promedio del árbol.....	63

13. Largo de fibra (mm) para el clon X9 en función de la edad.....	64
14. Largo de fibra (mm) para el clon X34 en función de la edad.....	66
15. Estimadores de los modelos de regresión para Longitud de Fibra en función de la altura por clon según la edad.....	66
16. Largo de Fibra promedio (mm) para las diferentes alturas de muestreo por clon según la edad.....	66
17. Longitud de fibra promedio (mm) para las tres zonas de muestreo en la base y al DAP por clon según la edad.....	69
18. Coeficiente de correlación entre densidad básica y longitud de fibra por clon según la edad.....	71

GRAFICO N°	Página
1. Evolución de la densidad básica en función de la edad.....	50
2. Modelos ajustados para la densidad básica en función de la altura real por edad para el clon X9.....	53
3. Modelos ajustados para la densidad básica en función de la altura real por edad para el clon X34.....	54
4. Variación radial de la densidad básica según la edad para el Clon X9.....	56
5. Variación radial de la densidad básica según la edad para el Clon X34.....	57
6. Correlación entre la densidad básica ( $\text{g/cm}^3$ ) y Pilodyn (mm) por clon.....	59
7. Evolución del Largo de Fibra en función de la edad.....	64
8. Modelos ajustados para Longitud de Fibra en función de la altura según la edad para los clones X9 y X34.....	67

9. Variación radial de la longitud de fibra según la edad para el clon X9.....	70
10. Variación radial de la longitud de fibra según la edad para el clon X34.....	70
11. Correlación entre longitud de fibra y densidad básica para los clones X9 y X34.....	72

## FIGURA N°

	Página
1. A) vista de ensayo clonal con 3,2 años de edad; B) Vista de ensayo clonal con 6,7 años de edad; C) Determinación al DAP del valor de penetración en árboles en pie de 3,2 años; D) Extracción de discos en clon híbrido (X 34); E) Discos extraídos a las diferentes alturas estudiadas para un mismo árbol del clon híbrido (X 34); F) Acondicionamiento individual de los discos en bolsas de polietileno.....	40
2. G) Marcación de probetas en disco, evitando defectos; H) Apertura del disco con la utilización de sierra sinfín; I) Probetas individuales de un mismo disco, los valores indican la altura de extracción del disco en el árbol y de la probeta en el diámetro; J) Probetas luego del pulido, tanto las caras como las aristas; K) Sellado de las caras transversales de las probetas con parafina; L) Volumenómetro de breuill.....	45
3. LL) Determinación del volumen de la probeta a través del desplazamiento de mercurio; M) Almacenamiento de probetas durante el secado; N) Medición del peso de probetas individuales, probetas en deshumidificador; Ñ) Proyección y medición de la longitud de las fibras sobre pantalla.....	46

## 1 INTRODUCCION

Rápido crecimiento, propiedades deseables de las fibras y bajo costo de producción han determinado el incremento de la demanda global de pulpa de celulosa de varias especies de *Eucalyptus* (Rockwood et al, 1995).

Aumentar la productividad forestal y mejorar la calidad de la madera para la producción de celulosa se han constituido en los principales desafíos para un programa de mejoramiento forestal (Bertolucci et al, 1992). La propagación clonal aparece como una posibilidad real de aumentar la uniformidad de la madera y por ende incrementar la eficiencia de la industria (Campinhos y Claudio-Da-Silva, 1990; Rockwood et al, 1995; Fonseca et al, 1996).

Al año 2000, la superficie forestada en el Uruguay asciende aproximadamente a 475 mil ha, de las cuales cerca de 140 mil (30 % del total) corresponden a *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Dada su importancia relativa, surge la necesidad de conocer las diferentes propiedades físicas, mecánicas y químicas que determinan las posibilidades de uso final de la madera de dicha especie.

La madera de *Eucalyptus* presenta una estructura heterogénea debido a las variaciones de sus elementos anatómicos. Por esta razón es importante determinar los padrones de variación existentes (Tomazello Filho, 1985).

La calidad de una hoja de papel es consecuencia del producto entre las propiedades de la madera y las fibras, y el proceso tecnológico utilizado en la producción de la lámina. Propiedades claves del papel, como ser la resistencia, opacidad, estructura superficial y propiedades de impresión, son determinadas por las propiedades de la madera y las fibras (Raymond, 1995).

Cuanto más temprano pueda ser evaluada una propiedad de la madera, antes podrán ser seleccionados los materiales en un programa de mejoramiento, lográndose una mayor ganancia genética por unidad de tiempo. Sin embargo, la decisión de cuando y como medir las diferentes propiedades debe basarse en los patrones de variación con la edad y la precisión del método de muestreo utilizado (Raymond, 2000).

En este marco se desarrolla el estudio de dos propiedades fundamentales determinantes de los posibles usos finales de la madera, como son la Densidad Básica y la Longitud de Fibra.

El presente estudio pretende determinar los patrones de variación de dichas propiedades dentro del árbol en función de la edad, tanto en altura como en diámetro, en dos clones de *Eucalyptus*. Se probaron dos métodos de muestreo, uno destructivo (Norma UNIT 237-1970) y otro no destructivo (Pilodyn), determinando la correlación entre ambos.

A partir de la información generada se intentó determinar los puntos de muestreo que mejor representen los valores promedio, y se estudiaron las correlaciones existentes entre ambas propiedades.

## **2 REVISION BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 DENSIDAD BASICA**

#### **2.1.1 Características generales**

Hace mas de cuatro décadas que se destaca la importancia de la selección y del mejoramiento de árboles para las características de la madera, en relación a la producción de pulpa (Dadswell y Wasdrop, 1959 y 1960, citados por Fonseca et al, 1996).

Se debe distinguir el peso específico aparente del peso específico de la madera. El primero hace referencia a la relación entre el peso y el volumen de la madera con poros, mientras que el peso específico considera solamente la relación entre el peso de la madera y su volumen sólido. Este último es relativamente constante entre especies, con un valor promedio de  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , variando en función de las proporciones de lignina y celulosa. (Tuset y Duran, 1979).

El peso específico aparente es extraordinariamente variable ya que depende no solo de la estructura misma de la madera, sino también del contenido de humedad de la muestra, la cual influye sobre el peso y el volumen. Esto implica que al comparar valores de peso específico aparente sea necesario indicar la humedad a la cual ese valor fue determinado. (Coronel, 1994).

Entre las diversas formas de expresión del peso específico aparente, se distinguen principalmente (Coronel, 1994):

- a) Peso específico aparente al 12 % de humedad. Corresponde a condiciones climáticas normalizadas de  $20^\circ \text{ C}$  de temperatura y 65% de humedad relativa del aire.
- b) Peso específico aparente al 15% de humedad. Corresponde al estado de la madera seca al aire.
- c) Peso específico aparente al 0% de humedad, llamado corrientemente peso específico aparente anhidro.

- d) **Peso específico aparente básico.** Definido como la relación entre el peso anhidro y el volumen verde de la muestra.

Esta última forma de expresión se utiliza frecuentemente en estudios teóricos y comparaciones, debido a la posibilidad de determinar un valor fácilmente reproducible, seguro e invariable.

Si bien la Norma utilizada en el presente estudio (UNIT 237-1970) hace referencia al método de determinación de peso específico aparente básico, en adelante se utilizará el término densidad básica en referencia al anterior. Esto responde a un acercamiento a la terminología utilizada internacionalmente. Por lo tanto la densidad básica es igual al peso específico aparente básico.

Se ha elegido la densidad básica, el porcentaje de corazón juvenil y la longitud de fibra como los parámetros más importantes para la madera pulpable (Bhat, 1990).

En función de su importancia y la facilidad de determinación frente a otros parámetros de calidad, la densidad básica se ha constituido en la característica más estudiada y difundida para la caracterización cualitativa de las diferentes maderas disponibles en plantaciones forestales (Ribeiro y Zani Filho, 1993; Downes et al, 1997).

La densidad básica es comúnmente usada como un índice de varias propiedades mecánicas y de la utilización potencial de la madera (Hans et al, 1972).

Investigadores han demostrado, tanto en coníferas como en latifoliadas, que la densidad de la madera varía considerablemente dentro y entre árboles, siendo su variación dependiente de la variación en los componentes de la madera.

La densidad no es una característica simple de la madera, sino una combinación de características, cada una de las cuales posee un sólido patrón hereditario (Van Buitjnen, 1964, citado por Zobel y Talbert, 1988).

Las variaciones de densidad entre y dentro de especies, responden a la diferente cantidad de sustancia leñosa y materiales extraños por unidad de volumen. La cantidad de sustancia leñosa está determinada en gran parte por las características estructurales de la madera, como tamaño y proporción de los distintos tipos celulares, y por el espesor de las paredes celulares, siendo esta última la de mayor efecto en la densidad (Brown et al, 1952, citados por Buzzo et al, 1997).

En cuanto a la influencia de la densidad básica en la producción de celulosa y papel, las maderas de alta densidad no son recomendables debido a que consumen más álcali durante el cocimiento, presentan un proceso de blanqueado más dificultoso, mayor cantidad de residuos, y por lo tanto presenta bajo rendimiento al final del proceso (De Souza, 1986). Por otro lado maderas de muy baja densidad presentan bajos rendimientos por unidad de volumen.

Bertolucci et al. (1992), y Bertolucci y Penchel (1993), han reportado que la densidad básica presenta valores elevados de correlación genotípica, tanto con variables de cocimiento, como el rendimiento depurado y la ganancia de producción, así como también con propiedades del papel, como la resistencia al aire y el índice de tracción, confirmando su importancia como uno de los principales parámetros para la selección forestal.

### **2.1.2 Variación con la edad**

Taylor (1984), comparando 20 árboles de entre 15 y 20 años concluye que existe una fuerte correlación entre la densidad básica de la madera juvenil y la de la madera de mayor madurez, formada hacia las zonas externas del fuste.

Bhat et al. (1990) comparando *Eucalyptus grandis* de 3,5,7 y 9 años de edad, obtuvieron que la densidad básica variaba entre 0.42 y 0.497 g/cm<sup>3</sup> para las cuatro edades analizadas. La menor densidad básica se obtuvo en los árboles de 5 años de edad, no existiendo diferencias significativas entre la densidad promedio para las demás edades. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Ladrach (1986) citado por Bhat et al. (1990), quien concluye que la densidad básica no varía entre los 4 y los 7 años de edad en *Eucalyptus grandis* plantados en Colombia.

Estos resultados difieren de los obtenidos por Ribeiro y Zani Filho (1993) quienes encontraron incrementos significativos en la densidad básica entre los 63 y 100 meses de edad, con un incremento del 9,8 % (0.458 y 0.503 g/cm<sup>3</sup> para ambas edades respectivamente), en 4 zonas del estado de San Pablo, Brasil.

Bertolucci y Penchel (1993), iniciaron investigaciones de selección precoz para determinar la edad mínima en que los mejores clones podrían ser seleccionados, debido a las diferencias de edad entre los ensayos y la edad de

corta final. A partir de los resultados obtenidos concluyen que los mejores clones identificados a los 2 años mantenían su superioridad a los 7 años.

Rockwood et al. (1995), basados en el muestreo de 45 árboles a los 13 y 90 meses de edad, indican que la densidad básica está correlacionada significativamente con la edad. Estos investigadores concluyen que la densidad aumenta entre los 13 meses y los 17 años de edad, haciendo viable la selección precoz de árboles individuales en base a dicha propiedad.

Trugilho et al. (1996), comparando materiales de *Eucalyptus grandis* de 12, 24, 36 y 48 meses de edad, observaron que si bien la densidad aumenta con la edad, muestra una clara tendencia a la estabilización o reducción de la tasa de incremento hacia las edades mayores. Este efecto estaría explicado según los autores, por la aproximación a las edades de producción de madera adulta, donde las características de la madera se hacen más estables.

Gashumba y Klem (1982), citados por Chapola y Ngulube (1990), en cambio, señalan que los árboles del género *Eucalyptus* producen madera razonablemente madura a partir de los 15 o 20 años.

Raymond (2000), indica que la densidad básica aumenta con la edad, y propone una edad mínima de muestreo de 3 años.

### **2.1.3 Variación dentro del árbol**

#### **2.1.3.1 Variación axial o longitudinal**

La gran mayoría de los resultados publicados indican que existe un incremento en la densidad con el incremento en altura, en ocasiones acompañado de una reducción inicial. El valor mínimo de densidad generalmente ocurre en el primer punto de muestreo sobre la base del árbol. En muestreos realizados cada 10 % de la altura del árbol, Manfredi (1985) citado por Downes et al. (1997), encontró que el mínimo de densidad se encontraba al 10 % de la altura. Cuando el muestreo se realizó cada 25 % de la altura (Bhat et al. 1990; Wilkins 1990), la densidad mínima fue reportada en el 25 % de la altura.

Teniendo en cuenta lo anterior Downes et al. (1997) afirman que la localización de la mínima densidad va a depender de la intensidad del muestreo

y por lo tanto no podría ser identificada con precisión si la base del árbol no es intensivamente muestreada.

Los resultados publicados pueden agruparse en cuatro patrones generales: a) aumento de la densidad con la altura; b) disminución de la densidad con la altura; c) disminución inicial seguida de un posterior incremento en altura; d) sin patrón definido.

Aumento con la altura: Malan (1982); Malan (1988 a); Ferrari (1995).

Disminución con la altura: Vital et al. (1981), citado por De Souza et al. (1986); Bamber y Humphreys (1963), Bamber et al. (1969), Sturion et al. (1987), citados por Downes et al. (1997).

Disminución inicial y posterior incremento con la altura: Hans y Burley (1972); Taylor (1973 a,b); Malan (1982); Stöhr y Mackay (1983); De Souza et al. (1986); Bhat et al. (1990); Wilkins (1990); Wilkins y Horne (1991); Bouvet y Bailleres (1995); do Vale et al. (1995); Rezende et al. (1998).

Sin patrón definido: Chapola y Ngulumbé (1990); Hans (1976).

Malan (1988a) señala que el comportamiento de la densidad con la altura depende de la zona radial que estemos considerando. Menciona que la altura explica el 60 % de la variación del peso específico en las secciones internas y solamente el 8 % de la variación en las secciones externas del árbol.

Estudiando árboles de 24 años de edad, Malan (1982), obtuvo dos patrones diferentes de variación con la altura, asociado a las tasas de crecimiento de los mismos. Este elemento será discutido más adelante.

Los muestreos de mayor intensidad en las zonas basales del árbol, fueron realizados por Taylor (1973 a,b), Malan (1982), Stöhr y Mackay (1983). Malan (1982), obtuvo que la densidad básica disminuía hasta los 4,8 m. de altura seguido de un rápido incremento en adelante. Stöhr y Mackay (1983), tomando muestras cada metro, en árboles de 14 años, observaron una fuerte caída desde la base hasta los 4,3 m., por encima de la cual hay un aumento gradual de la densidad básica con la altura. Taylor (1973 a,b), en árboles de la misma edad, obtuvo un fuerte descenso de la densidad básica hasta los 4,5 m. seguido de un incremento cuadrático hacia las alturas posteriores, es decir, que los incrementos en la densidad básica son decrecientes con la altura.

Bouvet y Bailleres (1995) en híbridos de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* de 5,6 años, obtuvieron un descenso de la densidad básica hacia el

DAP seguido de un incremento, también con tasas decrecientes, para las alturas superiores (25, 50, 75, 100 % de la altura comercial).

Varios autores señalan el 25 % de la altura total como la zona de menor densidad básica en el árbol, Bhat et al. (1990) en árboles de 3 a 9 años, Wilkins (1990) en árboles de 11,3 años, Wilkins y Horne (1991) en árboles de 9,5 años, y Rezende et al. (1998) en árboles de 8 años de edad. De Souza et al. (1986) en árboles de 7 años de edad obtuvieron los valores más bajos de densidad básica al DAP y 25 % de la altura comercial.

Hans y Burley (1972), estudiando árboles de 5 años de edad concluyeron que la densidad básica disminuye hasta el 15 % de la altura total (ht) y aumenta posteriormente hacia el 35 % de la ht.

Resultados contrarios fueron obtenidos por Chapola y Ngulube (1990) en árboles de entre 5 y 8 años. Los autores observaron que no existía ningún patrón de variación claro de la densidad básica por encima de la mitad de la altura del árbol. Hans (1976) citado por Downes et al. (1997) no encontró cambios significativos en la densidad relacionados a la altura del árbol.

Centurion y Llano (1995), comparando 68 árboles de *Eucalyptus grandis*, a los 12 años de edad creciendo en el mismo sitio, no obtuvieron un modelo que explicara el comportamiento de la densidad básica con la altura entre la base y los 6.3 m. El 54 % de los árboles no se ajustó a ningún modelo de regresión, mientras que el restante 46% se ajustó a modelos cúbicos o cuadráticos. El 50% de los árboles que se ajustaron a algún modelo, muestran un descenso de la densidad desde la base hasta los 3,5 m, para luego aumentar gradualmente hacia la copa. Otros árboles mostraron aumentos desde la base hasta 1,2 m, luego una disminución hacia los 4,2 m para aumentar nuevamente hacia la copa.

### **2.1.3.2 Variación radial**

La variación de la densidad básica ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación. Al igual que en la variación longitudinal, la variación de la densidad básica en el radio depende de la estrategia de muestreo utilizada. El patrón general observado consiste en incrementos en la densidad desde la médula hacia la corteza. Algunos autores han reportado un decrecimiento inicial próximo a la médula.

Los patrones observados pueden resumirse en los siguientes grupos:  
a) incremento desde la médula hacia la corteza; b) decrecimiento inicial seguido de un incremento hacia la corteza; c) decrecimiento hacia la corteza.

Incremento hacia la corteza: Hans et al. (1972); Hans (1974); Stöhr y Mackay (1983); Tomazello Filho (1985); Brasil y Ferreira (1979) y Brasil et al. (1979), citados por Gaiotto (1988); Malan (1988 a); Chapola y Nbulube (1990); Wilkins (1990); Malan y Hoon (1992); Lima et al (2000);

Decrecimiento inicial seguido de un incremento hacia la corteza: Taylor (1973 a,b); Malan (1982); Wilkins (1990); Wilkins y Horne (1991);

Decrecimiento hacia la corteza: Bamber et al. (1982); Chapola y Nbulube (1990).

El patrón observado con mayor frecuencia en la bibliografía es el incremento desde la médula hacia la corteza. Tales resultados fueron obtenidos por Malan (1988) en árboles de 27 años, Brasil y Ferreira (1979) en árboles de 16 años y Brasil et al. (1979) citados por Gaiotto (1988), Malan y Hoon (1992) en árboles de 34 años, Stöhr y Mackay (1983) en árboles de 14 años.

Otros autores obtuvieron resultados similares trabajando con árboles de menor edad que los de los trabajos anteriores. Hans et al.(1972) en árboles de 7 años, Hans (1974) en árboles de 5 años, Tomazello Filho (1985) en árboles de 10 años, Wilkins (1990) en árboles de 11 años de edad y Lima et al (2000), en clones híbridos naturales de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 8 años de edad.

Chapola y Ngulube (1990) señalan que la densidad es menor en la médula, aumentando hacia la corteza, aunque indican que en algunos casos el comportamiento es diferente, y la misma decrece desde las zonas interna y media hacia el exterior.

Este incremento del peso específico es reportado como lineal hacia la corteza por Hans et al. (1972), Hans (1974) y Malan (1988 a). Sin embargo varios autores observaron aumentos leves entre las secciones interna y media, y luego incrementos pronunciados entre las secciones media y externa. Es por este motivo que algunos trabajos indican relaciones cuadráticas o lineales con desviaciones. Malan y Hoon (1992) observó comportamientos variables en el diámetro en función de las tasas de crecimiento o grados de supresión del mismo, elemento que será discutido más adelante.

Por otro lado existen otros trabajos que señalan un descenso inicial desde la médula, y aumentos posteriores hacia la corteza. Malan (1982) observó que si bien existen variaciones entre árboles en cuanto a la relación de la densidad básica con la distancia desde la médula, esta disminuye hasta aproximadamente los 5 cm. y luego aumenta hasta los 17 cm. Taylor (1973 a,b), en árboles de 14 años de edad observó al DAP, un descenso del peso específico desde la médula (aprox. 4cm.) seguido de un incremento pronunciado hacia la corteza, superando ampliamente los valores de la médula. Wilkins y Horne (1991) observaron esta misma tendencia en árboles de nueve años y medio, indicando que esta tendencia se hace más pronunciada hacia el 50 % de la altura comercial.

Brasil y Ferreira (1972) estudiando la variación radial de diversas propiedades también en árboles de *Eucalyptus grandis* de 16 años de edad, obtuvieron en discos extraídos al DAP, descensos de la densidad básica desde la médula a la corteza, observación que otros autores realizan a alturas superiores del árbol.

El comportamiento radial de la densidad básica al DAP, no representa necesariamente el comportamiento de la densidad básica para todas las alturas. Diferentes comportamientos han sido observados por diversos autores, los cuales se mencionarán en el punto siguiente.

Centurión y Llano (1995) no observaron un patrón claro que representara la variación de la densidad básica en el radio. El 57% de los árboles no se ajustó a ninguno de los modelos propuestos. De los restantes, la mitad mostró un comportamiento lineal donde la densidad aumenta desde la médula a la corteza. En otro grupo de árboles obtuvieron una respuesta cuadrática, en la que la densidad desciende desde la médula hasta un mínimo para luego aumentar hacia la corteza.

### **2.1.3.3 Interacción entre la variación radial y longitudinal**

Bamber et al. (1969) citado por Downes et al. (1997) encontraron, en árboles de 20 años de edad, que la densidad básica decrecía con la altura en tejidos de la misma edad cronológica. Además observaron incrementos en la densidad desde la médula hacia la corteza para todas las alturas ensayadas.

Por otro lado, Taylor (1973 a,b), estudiando árboles de 14 años, obtuvo al DAP un descenso inicial de la densidad básica, seguido de un incremento

hacia el exterior. A una altura de 10,7 m este efecto era menos marcado, y a los 23 m observó prácticamente un descenso de la densidad básica desde la médula a la corteza. Stöhr y Mackay (1983), indican que en árboles de 14 años los gradientes de incremento de la densidad básica hacia la corteza, varían entre 0,055 y 0,162 g/cm<sup>3</sup>, y decrecen progresivamente con la altura. Malan (1982) obtuvo una reducción similar en los gradientes de densidad al aumentar la altura en árboles de 24 años de edad. Lima et al. (2000) reporta el mismo comportamiento en clones de híbridos naturales de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 8 años de edad, con un incremento promedio de 22,5 y 17,6 % entre la zona interna y externa, para ambos extremos, base y tope, respectivamente.

Estudios realizados por Wilkins (1990) en árboles de 11,3 años de edad, muestran incrementos en la densidad básica desde la médula a la corteza para la base y 25 % de la altura total (ht), mientras que al 50 % de la ht obtuvo un decrecimiento inicial seguido de un incremento posterior hacia el exterior.

Malan (1988 a), estudiando árboles de 27 años de edad, obtuvo incrementos continuos hacia la corteza para todas las alturas. También observó que la densidad básica de la madera formada por un cambium de la misma edad fisiológica aumenta linealmente con la altura, mientras que la densidad de la madera generada en determinado año, por un mismo cambium, no varía significativamente con la altura. En cambio Stöhr y Mackay (1983) observaron que el patrón de distribución vertical de la densidad básica se mantiene incambiado para las diferentes distancias desde la corteza.

#### **2.1.4 Variación entre árboles**

Una de las mayores fuentes de variación en la densidad básica se da entre árboles, en respuesta a factores tanto ambientales como genéticos (Downes et al, 1997). Esta variabilidad ha sido reportada por un elevado número de autores, quienes en muchas oportunidades destacan la importancia de esta fuente de variación dentro de una misma especie, la cual posibilita la selección de individuos que presentan las características deseables dentro de un amplio rango de variación.

A continuación se discutirán las posibles fuentes de dicha variación, tanto de origen genético como ambiental.

#### 2.1.4.1 Variación genética

##### 2.1.4.1.1 Variación entre especies del género *Eucalyptus*

Brasil y Ferreira (1971), obtuvieron diferencias significativas en la densidad básica de 3 especies, a los 5 años de edad, siendo *Eucalyptus alba* la de mayor densidad, seguido por *Eucalyptus saligna* y por último *Eucalyptus grandis* (0.532, 0.441 y 0.407 g/cm<sup>3</sup> respectivamente), para el sitio de mayor productividad. Cuando se considera el sitio de menor productividad *Eucalyptus alba* y *Eucalyptus saligna* no difieren significativamente, pero son superiores a *Eucalyptus grandis* (0.555, 0.553, 0.518 g/cm<sup>3</sup>).

Ferreira y Kageyama (1978), citados por De Souza et al. (1986), en sus estudios realizados entre los 5 y 7 años de edad, agrupan las diferentes especies de la siguiente forma:

- a) *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, y *Eucalyptus botryoides* presentan valores de densidad básica media, semejantes, en el entorno a 0.43 a 0.50 g/cm<sup>3</sup>.
- b) *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus resinifera*, *Eucalyptus urophylla* y *Eucalyptus propinqua* pertenecen al grupo de maderas con densidades en torno a 0.50 g/cm<sup>3</sup>.
- c) Con densidad básica superior a 0.50 g/cm<sup>3</sup> se destacan *Eucalyptus microcorys* y *Eucalyptus cloeziana* (0.610 y 0.603 g/cm<sup>3</sup> respectivamente).

Estudios de especies y procedencias realizados por De Souza et al. (1986) indican que si bien existen diferencias en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* (0.441 g/cm<sup>3</sup>) y *Eucalyptus saligna* (0.508 g/cm<sup>3</sup>), la variación entre procedencias es más importante que entre especies.

Los resultados de estudios realizados por Chapola y Ngulube (1990), en 4 especies del género *Eucalyptus* a edades de entre 5 y 8 años, indican que *Eucalyptus grandis* presenta la menor densidad, y junto con *Eucalyptus botryoides*, *Eucalyptus bicostata*, *Eucalyptus pilularis* y *Eucalyptus saligna*, pertenecen al grupo de especies con densidades menores a 0.5 g/cm<sup>3</sup>.

Ribeiro y Zani Filho (1993) en estudios comparativos de 5 especies y 15 procedencias, obtuvieron a los 80 meses de edad que el *Eucalyptus pellita* posee mayor densidad básica que *Eucalyptus urophylla*, y este que *Eucalyptus grandis*, siendo 27 y 18 % superiores al último respectivamente. A los 63 meses *Eucalyptus dunnii* muestra mayores densidades que *Eucalyptus saligna* y *Eucalyptus grandis*, siendo no significativa la diferencia entre los dos últimos.

Clarke et al. (1999), estudiando 9 especies en dos sitios a los 6 años de edad, encontraron que *Eucalyptus grandis* es la especie que presenta menor densidad básica en ambos sitios (densidades entre 0.41 y 0.45 g/cm<sup>3</sup>), seguido por especies como *Eucalyptus oreades*, *Eucalyptus fraxinoides*, *Eucalyptus fastigata*, *Eucalyptus saligna*. Las especies de mayores densidades fueron *Eucalyptus smithii* y *Eucalyptus macarthurii*, seguidos por *Eucalyptus dunnii* y *Eucalyptus nitens*.

Trabajos realizados con híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus tereticornis* indican que la densidad básica adquiere valores intermedios a los de las especies parentales, existiendo un efecto maternal significativo, siendo levemente superior la densidad básica cuando *Eucalyptus tereticornis* es el árbol madre. (Hans 1974)

#### **2.1.4.1.2 Variación entre procedencias**

Trabajos realizados por Barret et al. (1975), citado por De Souza et al. (1986), en *Eucalyptus grandis* de 5,5 años de edad, demostraron que para 7 de las 8 procedencias estudiadas, no hubieron diferencias significativas en cuanto a la densidad básica.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Ribeiro y Zani (1993), quienes estudiaron la variación del peso específico en 7 procedencias a los 77 meses de edad, sin encontrar diferencias significativas entre las mismas. Sin embargo, ambos trabajos destacan el amplio rango de variación del peso específico dentro de las procedencias, indicando la posibilidad de seleccionar dentro de las mismas.

Por otro lado De Souza et al. (1986), trabajando con árboles de 7 años de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, obtuvieron una elevada heterogeneidad entre procedencias y dentro de las mismas para ambas especies, destacando que la variabilidad entre procedencias es superior a la

registrada entre especies, indicando nuevamente, importantes posibilidades de selección entre y dentro de estas.

Rockwood et al. (1995) obtuvieron altos niveles de variación genética entre diversos orígenes de *Eucalyptus grandis*. Varghese et al. (1995), en sus estudios de 10 procedencias de *Eucalyptus grandis* de 10 años de edad, obtuvieron diferencias significativas entre procedencias, siendo la procedencia de mayor densidad básica promedio, 17 % superior a la procedencia de menor densidad (0,511 y 0,425 g/cm<sup>3</sup> respectivamente).

A diferencia de los resultados anteriores, estudios realizados por Clarke et al. (1999), en árboles de 6 años para diferentes especies, procedencias y sitios, no mostraron diferencias significativas entre procedencias, indicando que la mayor parte de la variación ocurre entre árboles, y que las mayores ganancias por mejoramiento se obtendrían seleccionando a este nivel. Resultados similares reportaron Wang et al. (1994), quienes no observaron diferencias significativas entre 15 procedencias de *Eucalyptus grandis*, pero destacan la alta variabilidad entre árboles de la misma especie, con un rango de variación entre 0,35 y 0,67 g/cm<sup>3</sup>.

#### **2.1.4.1.3 Variación entre familias**

Hans (1974), estudiando híbridos artificiales de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus tereticornis* a los 5 años de edad, obtuvo diferencias significativas entre familias, incluso cuando se consideran los efectos maternos. Por otra parte la variación más significativa se encuentra entre árboles dentro de una misma familia.

Wang et al. (1984) citado por Downes et al. (1997), examinando la variación en densidad de 20 familias de medios hermanos creciendo en Florida (USA) encontraron diferencias significativas entre familias, así como también entre individuos de una misma familia.

Malan (1988 b) obtuvo diferencias significativas para la densidad básica entre 18 familias de medios hermanos seleccionadas por buen crecimiento de entre 71 familias de polinización controlada, a los 8,5 años de edad. En estudios previos realizados por Kageyama et al. (1983) se reportaron diferencias significativas entre progenies de medios hermanos pero a los 3,5 años de edad.

Resultados similares a los presentados, obtuvieron Rockwood et al. (1995), en un ensayo de 27 familias, entre y dentro de las cuales se observó una elevada variabilidad genética, indicando que tanto la selección individual como de familias puede efectivamente modificar las propiedades básicas de la madera de *Eucalyptus grandis*.

Estudios realizados por Xavier et al. (1997) en 40 progenies de medios hermanos seleccionadas de 75 familias, muestran diferencias significativas entre las progenies y señala a la densidad básica como una característica sobre alto grado de control genético.

#### **2.1.4.2 Estimaciones de Heredabilidad**

La densidad de la madera está cerca de ser la característica óptima para ser manipulada genéticamente, debido a la gran variación que existe de un árbol a otro, a la gran heredabilidad, a su mínima interacción genotipo - ambiente y a sus importantes efectos sobre el rendimiento y la calidad. Tanto en latifoliadas como coníferas la heredabilidad del peso específico está dentro del rango de  $h^2 = 0.5$  a  $0.7$  (Zobel y Talbert, 1988).

Las primeras estimaciones encontradas en la bibliografía consultada, son las realizadas por Kageyama et al. (1983) en progenies de medios hermanos de *Eucalyptus grandis* a los 3,5 años de edad. Las estimaciones de heredabilidad en sentido estricto (plantas individuales) varían entre  $0.7$  y  $1.0$ , mientras que a nivel de familias varían entre  $0.67$  y  $0.79$ , confirmando el alto grado de control genético sobre la densidad de la madera.

Malan (1988 b), evaluando 18 familias de medio hermanos, obtuvo valores de heredabilidad en sentido amplio (medida como la proporción de la variación debida a las familias), en el entorno de  $0.54$ , siendo una de las propiedades más heredables, indicando que se pueden obtener importantes ganancias genéticas a través de la selección y propagación vegetativa.

Demuner y Bertolucci (1993), evaluando 9 clones en tres sitios a los 5 años de edad, obtuvieron estimaciones de heredabilidad en sentido amplio, a nivel de la media de los clones, de  $0.928$ , siendo la propiedad de mayor heredabilidad. Los autores concluyen que la densidad básica es una característica realmente heredable, hecho de gran interés dadas las altas correlaciones genotípicas de esta propiedad con otras propiedades de la madera y de la pulpa y papel. Resultados similares fueron obtenidos por

Bertolucci y Penchel (1993) donde la densidad básica fue la propiedad con el segundo valor de heredabilidad más cercano a 1.

Bouvet y Bailleres (1995), evaluando 31 clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, obtuvieron que las estimaciones de heredabilidad de la densidad básica superan a las de las propiedades de crecimiento, adquiriendo valores de 0.95. Los autores asignan estas diferencias a un menor efecto del ambiente sobre la densidad básica.

Xavier et al. (1997), evaluando 40 progenies a los 84 meses de edad, señala que la densidad básica es una característica sobre alto grado de control genético, con valores de heredabilidad, a nivel de la media de progenies, de 0.4426, superando a las demás características evaluadas salvo a la longitud de fibra.

Estudios recientes realizados por Lima et al. (2000) en 26 clones a los 8 años de edad, en 4 sitios, indican valores de heredabilidad en sentido amplio de 0.618, destacándola como una propiedad bajo un fuerte control genético.

### **2.1.4.3 Sitio, tratamientos silviculturales y tasa de crecimiento**

#### **2.1.4.3.1 Sitio**

En general es difícil diferenciar los efectos de manejo de los efectos de sitio debido a su interacción. Por otro lado resulta útil diferenciar las fuentes de variación que pueden ser manipuladas durante el crecimiento de las plantaciones, de aquellas inherentes al sitio en particular, como el tipo de suelo, temperatura y precipitaciones (Downes et al, 1997).

Zobel y Talbert (1988) señalan que en general, las características de calidad en los árboles forestales tienden a ser ampliamente heredables y menos afectadas por el ambiente que las características de crecimiento.

Estas afirmaciones coinciden con las observaciones de Taylor (1973 a), quien estudiando 5 sitios diferentes de plantación en Sudáfrica, no encontró diferencias significativas entre sitios. La variación entre parcelas dentro de un mismo sitio supera la variación entre sitios, adjudicando gran parte de la variación observada al potencial individual de algunos árboles para producir madera de mayor o menor densidad.

Bhat et al. (1990) no obtuvieron diferencias significativas para los 3 sitios estudiados, en ninguna de las edades ensayadas. Cabe destacar que estos investigadores no encontraron diferencias significativas entre árboles para ninguna de las edades (3 a 9 años).

A diferencia de lo expuesto anteriormente, Kageyama et al. (1983), comparando progenies de medios hermanos en 3 sitios, obtuvieron diferencias altamente significativas, indicando un marcado efecto de esta fuente de variación en la densidad de la madera. Por otro lado, la interacción genotipo x ambiente resultó no significativa, revelando la constancia del comportamiento de las progenies en los diferentes locales para la densidad de la madera, indicando un fuerte control genético de la característica.

Demuner y Bertolucci (1993), en su estudio de interacción entre clones y ambientes a los 5 años de edad, obtuvieron efectos significativos del ambiente sobre la densidad básica, indicando además la existencia de interacción significativa entre clones y sitios. Por otro lado las determinaciones de heredabilidad de la densidad resultaron sumamente elevadas.

Resultados similares fueron obtenidos por Malan y Verryn (1996), quien reportó diferencias altamente significativas entre sitios y una alta significancia del término interacción genotipo x ambiente, para 25 clones en 31 sitios diferentes. Wright y Endo (1993) obtuvieron diferencias significativas entre sitios y entre clones dentro de un mismo sitio, para 65 clones en 16 ensayos, a los 4 años de edad.

Brasil y Ferreira (1971), Rezende et al. (1998) y Clarke et al. (1999) obtuvieron diferencias significativas en la densidad básica para los sitios ensayados, relacionando dichas diferencias a la productividad de los diferentes sitios.

#### **2.1.4.3.2 Espaciamiento**

Brasil y Ferreira (1971), no obtuvieron diferencias significativas en la densidad básica, para los espaciamientos ensayados en dos sitios de diferente productividad, a los 5 años de edad. Solo en el sitio de menor productividad, el espaciamiento afectó significativamente el crecimiento en diámetro.

Vital y della Lucia (1987), citados por Downes et al. (1997) examinando el efecto del espaciamiento en la producción y calidad de madera de árboles creciendo en Brasil, concluyeron que ni el espaciamiento ni la tasa de crecimiento tienen efecto sobre la densidad de la madera.

Por el contrario Malan y Hoon (1992), plantean que el espaciamiento inicial tiene un importante efecto sobre el patrón de variación de la densidad básica en árboles de 34 años de edad. La densidad básica promedio es mayor a mayores intensidades de raleo. El grado de supresión tiene un efecto inverso en la uniformidad de la madera, árboles creciendo más libremente alcanzan mayores niveles de densidad básica más temprano en la vida del árbol, resultando en una madera más uniforme y de mayor densidad.

El planteo anterior es opuesto al realizado por Hans et al. (1972), quienes proponen utilizar altas densidades iniciales para enlentecer el crecimiento inicial, e inducir mayores crecimientos a edades posteriores mediante manejo silvicultural. Este mayor crecimiento busca reducir la densidad básica hacia la periferia y de esta forma el gradiente de la misma.

#### **2.1.4.3.3 Tratamientos silviculturales**

Los tratamientos silviculturales procuran incrementar las tasas de crecimiento de las plantaciones. Diversos investigadores han comprobado que aquellos tratamientos que incrementan las tasas de crecimiento tienden a aumentar la densidad básica de la madera. Tales resultados fueron reportados por Wilkins (1990) para árboles de 11,3 años, donde se ve un incremento en la densidad básica en función de las tasas de crecimiento resultante de los diferentes tratamientos.

Trabajando con árboles de 9 años y medio y similares tratamientos silviculturales, Wilkins y Horne (1991), indican que no hay relación clara entre la densidad y las tasas de crecimiento. Los tratamientos resultaron en incrementos de hasta 11 % en la densidad e incrementos volumétricos de hasta 270 %.

Otros investigadores, estudiando los efectos de diferentes fertilizaciones, obtuvieron resultados contradictorios. Hans y Burley (1972) en árboles de *Eucalyptus grandis* de 5 años de edad, concluyen que la fertilización con B y NPK a la plantación no tuvo efectos estadísticamente significativos sobre la densidad básica. Los autores concluyen que, dada la alta variabilidad entre

árboles se debería ampliar el tamaño de la muestra para predecir el comportamiento de las propiedades de la madera en respuesta a la fertilización.

Por el contrario, Vigneron et al. (1995), obtuvieron efectos significativos de la fertilización, tanto sobre el crecimiento como en la densidad básica. Destaca que esta última mostró un amplio rango de variación entre clones y entre árboles de un mismo clon. La correlación positiva entre la circunferencia y la densidad básica, indica que cuanto mayor es el crecimiento mayor es la densidad, a pesar de que este incremento es escaso.

#### **2.1.4.3.4 Tasa de crecimiento**

La literatura provee información variada en cuanto a cómo afecta la tasa de crecimiento a la densidad básica. La correlación existente entre la tasa de crecimiento y la densidad puede ser: a) positiva; b) negativa; c) no existe relación alguna.

Correlación positiva: Malan (1982); Stöhr y Mackay (1983); Wilkins (1990); Malan y Hoon (1992); do Vale et al. (1995); Vigneron et al. (1995); Xavier et al. (1997).

Correlación negativa: Brasil y Ferreira (1971); Hans y Burley (1972); Hans et al. (1972); Malan (1988 b); Malan (1991); Schonau (1991); Ribeiro y Zani Filho (1993); Rezende et al. (1998); Menezes et al. (1998); Barrichelo et al. (2001).

Sin correlación: Bamber et al. (1969) citado por Downes et al. (1997); Taylor (1973 a,b); Taylor (1984); Bamber et al. (1982); Kageyama et al. (1983); Bhat et al. (1990); Wright y Endo (1993); Bouvet y Bailleres (1995).

Stöhr y Mackay (1983), comparando árboles de 14 años con iguales situaciones de manejo en un mismo sitio, observaron que los árboles de menor crecimiento muestran una clara tendencia a exhibir menor densidad básica. Destacan que los árboles de crecimiento rápido muestran mayores valores de densidad en todas las alturas muestreadas, ya que los patrones de variación vertical no presentan diferencias asociadas a la tasa de crecimiento.

Otros investigadores, en trabajos posteriores observan variaciones significativas incluso en los padrones de distribución longitudinal y radial de la densidad básica. Wilkins (1990) observó que los tratamientos que resultan en

altas tasas de crecimiento, ven incrementada la densidad de la madera. En el tratamiento de menor crecimiento, la caída de la densidad básica con la altura es más rápida. Por otro lado no encontró una relación clara entre la densidad básica y las tasas de crecimiento dentro de los distintos tratamientos.

Malan (1982), estudiando árboles de 24 años de edad en dos sitios, observó que los árboles de lento crecimiento no solo producen madera de menor densidad básica en las zonas bajas del tronco, sino que además la DB decrece entre los 2,4 y 4,8 m. de altura, seguido de un rápido incremento en adelante. En árboles de rápido crecimiento la densidad básica aumenta gradualmente entre los 2,4 y los 9,6 m. seguido de un incremento más pronunciado hacia los 12 m.

Malan y Hoon (1992), observaron que la densidad básica, tiende a aumentar en árboles de mayor crecimiento, argumentando que árboles creciendo más libremente producen madera adulta a edades más tempranas. Concluyen que acelerar las tasas de crecimiento no tiene efectos detrimentales en las propiedades básicas de la madera, y además reducen la variación de las mismas dentro del árbol.

Vigeneron et al. (1995), obtuvo correlaciones débiles y positivas entre la tasa de crecimiento y los valores de densidad básica, indicando que en determinados genotipos, crecimientos acelerados provocarían incrementos escasos pero significativos en la densidad básica.

Resultados similares obtuvieron Xavier et al. (1997), estudiando 40 familias a los 84 meses de edad. Obtuvieron valores de correlación genética, fenotípica y ambiental, de baja magnitud entre las características silviculturales y la densidad básica.

Por otro lado, las tendencias reportadas con más frecuencia indican una correlación negativa, es decir, mayores tasas de crecimiento se asocian a decrecimientos en la densidad básica de la madera.

Brasil y Ferreira (1971), indican que la densidad básica media de los árboles creciendo a tasas inferiores (en sitios de menor productividad), es significativamente superior a la de los árboles creciendo a altas tasas con valores de 0,542 y 0,460 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Los autores destacan que si bien las semillas provienen de lotes idénticos, existe un elevado porcentaje de híbridos naturales, pudiendo incidir en los resultados reportados.

Hans et al. (1972), comparando la densidad básica de los radios de diferentes largos, o sea, de mayor y menor crecimiento en discos excéntricos,

obtuvieron diferencias significativas entre ambos, siendo los radios de menor crecimiento los que presentan mayor densidad básica.

Hans y Burley (1972), trabajando con distintas dosis de fertilizantes, concluyen que aquellos tratamientos que tienden a favorecer la producción volumétrica de madera, tienden a reducir en cierta medida la densidad básica de la madera.

Resultados similares fueron obtenidos por Ribeiro y Zani Filho (1993) y Rezende et al. (1998), quienes reportaron que los árboles creciendo en mejores condiciones edafoclimáticas, y por lo tanto a mayores tasas de crecimiento, muestran un descenso de la densidad básica.

Malan (1988 b), en su estudio de 18 familias de medios hermanos a los 8,5 años de edad, obtuvo correlaciones genéticas y fenotípicas negativas fuertes a moderadas entre el crecimiento en diámetro y altura con la densidad básica. A partir de los resultados obtenidos el autor concluye que la selección para incrementar el crecimiento volumétrico puede resultar en decrecimientos de la densidad básica.

En trabajos posteriores Malan (1991), observó que las correlaciones fenotípicas entre la tasa de crecimiento y las propiedades de la madera no son significativas o presentan escasa importancia práctica. En cambio, obtuvo correlaciones genéticas negativas significativas entre la tasa de crecimiento y la densidad básica, confirmando los resultados de trabajos anteriores. El autor concluye que se puede asumir con certeza, que aumentar las tasas de crecimiento a través de prácticas silvícolas no provocará cambios detrimentales en las propiedades de la madera.

Schönau (1991), estudiando la densidad básica en plantaciones talleares, obtuvo que la reducción de las tasas de crecimiento dejando un mayor número de rebrotes por cepa resulta en un incremento de la densidad básica. También reportó incrementos de la densidad básica del árbol entero al incrementar los diámetros.

Menezes et al. (1998), estudiando diferentes especies, sitios y clases de productividad, en árboles de 6 y 7 años de edad, concluyen que la productividad presenta buena correlación con la densidad básica. A medida que aumenta la productividad se reduce la densidad básica de la madera.

Estudios recientes realizados por Barrichelo et al. (2001) en clones de *Eucalyptus urophylla*, creciendo en tres sitios de diferente productividad, indican correlaciones negativas entre la tasa de crecimiento y la densidad básica.

Varios autores reportan que no han encontrado relación entre la densidad básica y la tasa de crecimiento de los árboles. Taylor (1973 a,b) estudiando la variación de la densidad básica entre radios excéntricos representando diferentes tasas de crecimiento, no obtuvo diferencias significativas, indicando que otros efectos diferentes de la tasa de crecimiento en el radio son responsables de la variación de la densidad básica.

El mismo autor, comparando la madera de árboles de entre 15 y 20 años de edad en dos sitios contrastantes, no obtuvo correlación significativa entre la tasa de crecimiento y la densidad básica (Taylor, 1974). El autor concluye que si bien los árboles de rápida elongación producen madera de menor densidad básica, esta no se relaciona con la tasa de crecimiento en diámetro de los árboles.

Bamber et al. (1982) no encontraron diferencias en la densidad básica de árboles de 2,5 años de edad, en rápido crecimiento con respecto a árboles creciendo normalmente, cuando las altas tasas de crecimiento se logran a partir de manejo silvicultural (fertilización y control de malezas y plagas). Los autores concluyen que el aumento de las tasas de crecimiento mediante manejo silvicultural no afecta la densidad básica, ya que no tienen efecto en los tejidos mecánicos de la madera. Por otro lado las mayores tasas de crecimiento si afectan cuantitativamente aspectos de las células fisiológicamente activas como los vasos (más pequeños y menos frecuentes) y radios parenquimáticos (más abundantes).

Resultados contrastantes obtuvieron Wilkins (1990) y Wilkins y Kitahara (1991), quienes concluyen que si bien los tratamientos que resultan en mayores tasas de crecimiento poseen mayor densidad básica, no encontraron una relación clara entre la densidad básica y las tasas de crecimiento dentro de los diferentes tratamientos.

Bhat et al. (1990) encontraron que la densidad básica no está consistentemente relacionada con el crecimiento en altura o diámetro, examinando sitios de diferente productividad a diferentes edades.

Wright y Endo (1993) obtuvieron coeficientes de correlación entre la densidad básica y la altura total contra el volumen, de 0,057 y de 0,025 respectivamente. Estos valores no significativos estarían indicando que no hay correlación entre la tasa de crecimiento y la densidad básica para los 65 clones evaluados a los 4 años de edad.

Bouvet y Bailleres (1995) trabajando con 31 clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* a los 68 meses de edad, obtuvo correlaciones genéticas débiles y negativas cuando la densidad básica se mide al DAP, y débiles y positivas cuando se consideran los valores promedio en el árbol. Esta última explica mejor la relación entre la tasa de crecimiento en volumen y la densidad básica, adquiriendo un valor de 0,15. Los autores concluyen que seleccionando solo por crecimiento se obtienen clones con una amplia gama de valores de densidad básica.

## **2.2 LONGITUD DE FIBRA**

### **2.2.1 Características generales**

Las dimensiones de las fibras están estrechamente relacionadas con las propiedades de la pulpa celulósica y el papel. El largo de fibra es una característica que muestra gran variabilidad y también una marcada heredabilidad. Aunque su efecto sobre el producto final es menor que el de la densidad básica (Barefoot et al. 1970, citado por Zobel y Talbert 1988), la longitud de las fibras puede tener efectos importantes en las propiedades del papel, especialmente en las latifoliadas de fibras cortas (Zobel y Talbert 1988). Esta afirmación es corroborada por Demuner et al. (1991) quienes sostienen que el largo de fibra tiene efectos significativos sobre la conformación del papel y por lo tanto sobre sus propiedades, independientemente del efecto de la flexibilidad de las fibras, propiedad íntimamente vinculada a la densidad de la madera.

Las plantaciones de *Eucalyptus* son desarrolladas en varios países debido a la excelencia de sus propiedades papeleras, particularmente en papeles de impresión. Esto se debe fundamentalmente al largo de sus fibras y al delgado espesor de sus paredes, dando al papel una formación uniforme, excelentes propiedades a su superficie y una elevada opacidad. Las propiedades más importantes de las fibras para la producción de pulpa y papel son el largo de fibra, el diámetro y el espesor de la pared celular (Downes et al. 1997).

En relación a la longitud de fibra Barrichelo et al. (1983) citado por Tomazello Filho (1985) verificaron que fibras mas largas resultan en papeles con mayores índices de resistencia, debido a un incremento en la eficiencia de las uniones interfibrilares durante el proceso de refinación.

Fibras con paredes más espesas (maderas con mayores valores de densidad básica) dan lugar a papeles con estructuras más abiertas, con mayores valores de "bulk", de opacidad y de aspereza superficial, para un mismo nivel de refinación. Estas características tienen efecto significativo sobre las propiedades de resistencia del papel, principalmente en aquellas que dependen fundamentalmente del número y de la resistencia entre las uniones de las fibras (Demuner et al. 1991).

### **2.2.2 Variación con la edad**

Trugilho et al. (1996), comparando árboles de 1, 2, 3 y 4 años de edad, obtuvieron que el largo de fibra promedio tiende a aumentar con la edad. Por otro lado indican que este incremento adquiere tasas decrecientes a edades mayores, tendiendo a estabilizarse hacia los 4 años. El largo de fibra promedio pasa de 0.69 en el primer año a 0.90 al cuarto año.

Gomes da Silva y Braga (1997), comparando muestras de *Eucalyptus urophylla* entre 1 y 7 años de edad, señala que el largo de fibra tiende a aumentar con la edad, destacando que el material analizado aún se encuentra en el período de desarrollo juvenil.

Bhat et al. (1990), concluye que la longitud de fibra aumenta con la edad entre los 3 y los 9 años, destacando que la tasa de incremento tiende a disminuir luego de los 5 años de edad.

Los resultados anteriores son coincidentes con lo propuesto por Raymond (2000), quien señala que la longitud de fibra tiende a aumentar con la edad, proponiendo que los materiales a incorporar en un programa de mejoramiento sean evaluados a partir de los 5 años de edad.

### **2.2.3 Variación dentro del árbol**

#### **2.2.3.1 Dentro del anillo de crecimiento**

Zobel y van Buijtenen (1989) citados por Downes et al. (1997) reportaron que la variación dentro de un anillo de crecimiento, es generalmente mayor que

la variación dentro del árbol, debido a la diferencia en la microestructura de la madera causada por la transición de madera temprana a madera tardía.

El momento de la transición entre leño temprano y leño tardío está fuertemente controlado genéticamente, pero puede ser afectado por factores ambientales como el fotoperíodo, la humedad y la temperatura. Esto determina la ocurrencia de variaciones dentro del anillo de crecimiento año a año (Dadswell and Wardrop 1959; Zobel and van Buijtenen 1989; citados por Downes et al. 1997).

### **2.2.3.2 Variación radial**

Universalmente se ha reportado un incremento del largo de fibra desde la médula hacia la corteza en plantaciones de *Eucalyptus*, tendiendo a un *plateau* en la madera madura próxima a la corteza. El patrón de incremento varía, alcanzándose dicho *plateau* entre los 5 y 12 años de edad, lo cual estaría explicado por el espaciamiento y la tasa de crecimiento (Downes et al. 1997).

Hans et al. (1972) en árboles de 7 años, dividieron el radio en 3 segmentos iguales, donde observaron que el incremento más marcado se da entre los segmentos 1 y 2 desde la médula (0,87 a 0,96 mm), seguido de un incremento más moderado desde el segmento 2 al 3 (0,96 a 1,01 mm).

Taylor (1984), encontró importantes variaciones entre árboles de entre 15 y 20 años de una misma parcela para esta propiedad. Si bien el largo de fibra aumenta desde la médula hacia la corteza, concluye que el largo de fibra de la madera juvenil (médula) no se correlaciona con el largo de fibra de la madera más madura formada posteriormente (hacia la corteza). Por otro lado, y a diferencia de otros autores, señala que el largo de fibra tiende a decrecer en los anillos posteriores, luego de aumentar rápidamente en los anillos cercanos a la médula (Taylor 1973 a,b).

Brasil et al. (1979) y Brasil y Ferreira (1979), citados por Gaiotto (1988) observaron un aumento del largo de fibra desde la médula a la corteza, en árboles de 3 años de edad. Varghese et al. (1995) observaron el mismo efecto en árboles de 10 a 11 años de edad, mientras que Bhat et al. (1990) comprobaron el mismo comportamiento para el rango de edades entre 3 y 9 años.

Tomazello Filho (1985), en árboles de 10 años de edad observó que más del 90% de las fibras se concentran en valores entre 0,6 y 1,4 mm. Hacia la médula un 90% de las fibras miden entre 0,5 y 0,8 mm, mientras que hacia la corteza un 85 % de las fibras miden entre 1,1 y 1,5 mm.

### **2.2.3.3 Variación longitudinal**

La variación con la altura de la anatomía de la madera, parecería ser menos consistente que la variación en el radio.

Taylor (1973 a, b) reportó que la altura de muestreo tiene escaso efecto sobre el largo de fibra. Hacia la médula existe una escasa variación de la longitud de fibra con la altura, mientras que hacia la corteza esta variación es mucho mayor. El autor concluye que esta uniformidad entre las células hacia la médula, indica que el cambium vascular originado por el meristema apical es similar en todas las alturas, y que las fibras formadas por el xilema secundario de origen cambial, alcanzan aproximadamente el mismo largo durante el proceso de elongación y diferenciación celular.

Bhat et al. (1990) obtuvieron el mismo comportamiento en todas las edades evaluadas (3, 5, 7 y 9 años), reportando un incremento del largo de fibra hasta un 25 % de la altura total, seguido de un decrecimiento hacia la copa. Los modelos de regresión cuadrática ajustados por los autores explican el 98 o 99 % de la variación del largo de fibra en función de la altura para las diferentes edades.

### **2.2.4 Variación entre árboles**

Al igual que para la densidad básica de la madera, existe gran variabilidad en el largo de fibra, debido tanto a factores genéticos como ambientales. Esta variabilidad ha sido reportada por diversos autores, destacando muchas veces el elevado componente genético de su variación y las posibilidades de selección y ganancia genética dobles de obtener al incorporar esta propiedad en un programa de mejoramiento genético.

### 2.2.4.1 Variación genética

Hans et al. (1972) indican que un 66% de la variación en la densidad aparente básica y el largo de fibra responden a la variación entre árboles y dentro del árbol (en sentido radial).

Taylor (1973 a, b) reportó diferencias pequeñas pero significativas trabajando con 5 árboles, con un alto grado de variabilidad entre las diferentes alturas de medición. Estudiando 20 árboles por parcela en dos sitios y diez áreas fisiográficas, encontró diferencias importantes entre árboles de una misma parcela, sugiriendo una alta variabilidad genética del largo de fibra. Los valores promedio obtenidos oscilan entre 0,84 y 1,19 mm (Taylor 1984).

Du Plooy (1980) comparando el largo de fibra de 20 árboles de entre 18 y 24 años, obtuvo diferencias elevadas entre individuos con un rango de valores entre 0,89 y 1,36 mm. para el largo de fibra promedio. Demuner et al. (1991) obtuvo una alta variabilidad en el largo de fibra promedio comparando 244 árboles, 144 clones de 7 años y 100 híbridos de 4 a 7 años de edad. Obtuvieron un valor promedio de 0,8 mm, con un rango de 0,68 a 1,05 mm.

A diferencia de los autores anteriores, Bhat et al. (1990) no obtuvieron diferencias significativas entre árboles para el largo de fibra promedio a ninguna de las edades evaluadas.

Tomazello Filho (1985) estudiando árboles de 10 años de 2 especies, observó que el largo de fibra de *Eucalyptus grandis* posee valores intermedios a las dos procedencias de *Eucalyptus saligna* estudiadas.

Varghese et al. (1995), comparando 10 procedencias de *Eucalyptus grandis*, no obtuvieron diferencias significativas para el largo de fibra, cuyos valores fluctuaron entre 1,10 y 1,23 mm. Sin embargo la densidad básica y las demás propiedades de las fibras mostraron diferencias significativas entre procedencias.

Comparando 18 familias de medio hermanos, Malan (1988 b) concluye que existen diferencias significativas para el largo de fibra entre familias, resaltando la gran proporción de la variación debida a la genética. Xavier et al. (1997), comparando las 40 mejores progenies de 75 familias, obtuvieron diferencias altamente significativas entre familias para el largo de fibra.

Bertolucci et al. (1992), comparando 9 clones de 5 años de edad en un único sitio de plantación, observaron una elevada variabilidad natural para el largo de fibra promedio, con un rango de valores de entre 0,65 y 0,79 mm.

Resultados similares fueron obtenidos por Malan y Verryn (1996) estudiando el comportamiento de 31 clones en 31 sitios, donde obtuvieron diferencias altamente significativas entre clones, pero no observaron efectos de interacción significativos.

#### **2.2.4.2 Estimaciones de Heredabilidad**

Malan (1988 b), a partir de 18 familias de medio hermanos obtuvo estimaciones de heredabilidad del orden de 0,54, calculada como la proporción de la variabilidad total. En estudios posteriores, evaluando 216 árboles de 72 familias obtuvo valores de heredabilidad de 0,62 (Malan 1991).

Estudios realizados por Demuner y Bertolucci (1993) señalan valores de heredabilidad en sentido amplio de 0,591, estimada a partir de la media de los clones evaluados, siendo la propiedad de las fibras de menor heredabilidad entre las evaluadas.

Por otro lado, trabajos posteriores realizados por Xavier et al. (1997) señalan al largo de fibra como la propiedad de mayor heredabilidad para los cuatro tipos de heredabilidad calculada, incluso superiores a los de la densidad básica, concluyendo que esa es una característica bajo alto grado de control genético. El valor estimado de heredabilidad a nivel de las medias de las progenies es de 0,5894.

#### **2.2.4.3 Sitio, tratamientos silviculturales y tasa de crecimiento**

##### **2.2.4.3.1 Sitio**

Bhat et al. (1990) encontraron diferencias significativas en el largo de fibra entre 3 localidades, diferencias que no eran significativas para la densidad básica, a pesar de las grandes variaciones en crecimiento de los árboles entre sitios.

Demuner y Bertolucci (1993), en sus 3 experimentos de evaluación de clones a los 5 años de edad para el largo de fibra no encontraron diferencias significativas entre clones, siendo el único efecto significativo la diferencia entre sitios. Tampoco se obtuvieron efectos de interacción significativos entre clones y ambientes, lo cual simplificaría la evaluación de los clones en un programa de mejoramiento, ya que la clasificación de los clones no variaría de un sitio a otro.

Comparando 31 clones en 31 sitios diferentes, Malan y Verryn (1996) obtuvieron una alta significancia para las variaciones entre sitios y clones, y coincidiendo con los resultados anteriores, efectos no significativos para la interacción. Por otro lado destacan que los clones que se mostraron susceptibles a cambios en el ambiente para una propiedad en particular, no necesariamente resultan susceptibles al ambiente para otras propiedades.

#### **2.2.4.3.2 Tratamientos silviculturales**

Zobel y van Buijtenen (1989) citados por Downes et al. (1997), argumentan que la manipulación de los efectos ambientales y silviculturales puede ser una práctica efectiva para modificar la variabilidad dentro de los anillos. En contraste, Wilkes (1988) citado por Downes et al. (1997), concluye que las condiciones de crecimiento y la tasa de crecimiento *per se*, en *Eucalyptus* son menos importantes en la determinación de la variación entre y dentro de los árboles que el genotipo y la edad, en particular la edad cambial.

Hans y Burley (1972), probando diferentes dosis de fertilización con NPK y B, concluyen que la fertilización no tiene efectos estadísticamente significativos sobre el largo de fibra. Por otro lado pequeñas dosis de fertilizante (NPK o B) producen fibras levemente más largas que sin fertilización o con dosis importantes.

Wilkins y Kitahara (1991), probando diferentes prácticas silvícolas (fertilización, control de plagas, malezas y raleos), no obtuvieron efectos significativos de los diferentes tratamientos en el largo de fibra.

Malan y Hoon (1992) no encontraron un patrón de variación definido del largo de fibra en relación a la intensidad de raleo. Los patrones de variación radial de largo de fibra tienden a ser similares entre los diferentes tratamientos.

Subrahmanyam (1988), citado por Downes et al. (1997) investigó el efecto del agregado de fósforo y nitrógeno sobre la longitud de fibra de

*Eucalyptus grandis*. El sitio en donde se desarrolló el experimento era considerado como deficiente en ambos macro nutrientes. Observó que el agregado de nitrógeno (a cualquier nivel) tendería a incrementar del largo de fibra independientemente del agregado de fósforo. También observó que el agregado de fósforo a bajo nivel generalmente incrementaba el largo de las fibras, mientras que a altos niveles tendería a un decrecimiento de largo de las mismas. Los tratamientos con nitrógeno también resultaban en un crecimiento en diámetro y en altura, mientras que el fósforo sólo incrementaba el crecimiento del árbol si era aplicado en combinación con nitrógeno. Estos resultados parecerían demostrar una correlación positiva entre el nivel nutricional, tasa de crecimiento del árbol y longitud de las fibras.

#### **2.2.4.3.3 Tasa de crecimiento**

Comparando zonas de mayor y menor crecimiento en árboles excéntricos, Hans et al. (1972) obtuvieron que los radios de menor crecimiento poseen fibras más largas. Estos resultados sugieren que crecimientos más lentos resultarían en fibras más largas o que un cambium en altas tasas de división celular resultaría en fibras más cortas.

Taylor (1984), comparando parcelas de alto y bajo crecimiento en un amplio rango de sitios, encontró que el largo de fibra no está relacionado claramente con el crecimiento en diámetro. Por otro lado encontró que los árboles de rápida elongación producen fibras más largas que aquellos con crecimiento en altura más lento.

Bamber et al. (1982), comparando 19 árboles de 30 meses, concluye que el aumento de las tasas de crecimiento a través de tratamientos silviculturales no tiene efectos significativos en el largo de fibra. El largo de fibra promedio es de 0,81 y 0,82 para los respectivos tratamientos.

Malan (1988 b), comparando 18 familias de medio hermanos, obtuvo fuertes a moderadas correlaciones genotípicas negativas entre el DAP y la altura con el largo de fibra (-0,769 y -0,781, respectivamente). Basado en estos resultados concluye que la selección para aumentar el crecimiento de los árboles en altura o diámetro puede tener efectos depresivos del largo de fibra, el cual tendría efectos no deseados en las propiedades de calidad y resistencia del papel.

Estudios posteriores realizados por el mismo autor (Malan 1991) señalan correlaciones genotípicas negativas pero de menor magnitud que en los estudios anteriores, a partir de las cuales concluye que la selección por mayores tasas de crecimiento no tendría efectos perjudiciales importantes en el largo de fibra. Las correlaciones fenotípicas nuevamente son de escasa magnitud y despreciables desde el punto de vista práctico.

En cambio Bhat et al. (1990), comparando árboles de 3, 5, 7 y 9 años en tres localidades, no encontraron una relación consistente entre los parámetros de crecimiento y el largo de fibra, salvo a los 9 años, para la cual obtuvieron una correlación débil y negativa.

### **2.2.5 Correlación con la Densidad Básica**

Hans et al. (1972) evaluaron la variación en la calidad de madera en sentido radial de *Eucalyptus grandis* de 6 años de edad creciendo en Zambia, a partir de discos retirados a 1,5 m de altura. Reportaron que el comportamiento diferente entre la densidad y la longitud de fibra en los puntos de muestreo dentro del radio es una de las razones que explica el bajo valor de correlación encontrado entre ambas propiedades (0,25), si bien ambas aumentan desde la médula a la corteza.

Vasconcellos Dias y Claudio da Silva (1985) trabajando con 25 híbridos de *Eucalyptus grandis* de 7 años de edad, reportaron que la longitud de fibra y el contenido de extractivos no están correlacionados con la densidad básica de la madera.

Garlet (1994), citado por Xavier et al. (1997), señala que la densidad básica es una característica ligada a la calidad de la madera, y que se correlaciona con el largo y con el diámetro del lumen de las fibras. Por otro lado Xavier et al. (1997) obtuvieron en árboles de 84 meses de edad de *Eucalyptus grandis*, correlaciones genéticas y fenotípicas positivas pero de baja magnitud entre el largo de fibra y la densidad básica (0,3498 y 0,2228 respectivamente).

Demuner et al. (1991) observaron que la densidad básica y el largo de fibra están fuerte y positivamente relacionadas. Si bien la densidad básica es responsable de la mayor parte de la variación de las propiedades del papel (48 a 62%), el largo de fibra y el "coarseness" poseen efectos significativos sobre la consolidación del mismo y consecuentemente sobre sus propiedades.

Trugilho et al. (1996) trabajando con *Eucalyptus grandis* con edades comprendidas entre 1 y 4 años, reportan que la densidad básica presenta, de modo general, significativos y elevados coeficientes de correlación con las características dimensionales de las fibras. Mencionan un valor de correlación de 0,821 entre la densidad básica y el largo de fibra.

Por el contrario, Malan (1991) reporta un coeficiente de correlación de -0,25 entre la densidad de la madera y la longitud de fibra, para *Eucalyptus grandis* de 8,5 años de edad. Esta correlación inversa entre estas propiedades es corroborada por Malan y Verryn (1996), quienes reportan que la longitud de fibra está fuertemente y negativamente correlacionada (-0,69) con la densidad de la madera, trabajando con *Eucalyptus grandis* puros e híbridos de 5 años de edad.

Bhat et al. (1990) trabajando con *Eucalyptus grandis*, reportaron un valor significativo de correlación (-0,76) entre la longitud de fibra y la densidad básica en árboles de 9 años de edad, mientras que para las otras edades estudiadas los valores de correlación no fueron significativos.

### **2.3 METODOS DE MUESTREO**

Los métodos de colecta de muestras de árboles se dividen en dos grandes grupos los destructivos y los no destructivos. Dentro de los métodos de muestreo destructivos, se distinguen tres estrategias de muestreo de la madera: a) rolos; b) fuste entero; c) discos. Los rolos son trozas del fuste obtenidas en determinadas zonas y generalmente las muestras representan la copa, la sección media y la base del fuste. En el segundo tipo de muestreo el estudio se realiza a partir del fuste entero del árbol, el cual comúnmente se "chipea" para obtener una muestra representativa de todo el árbol. El muestreo de discos hace referencia a la extracción de pequeñas trozas obtenidas de un rango de alturas. La frecuencia de muestreo en la altura determinará el patrón de variación observado.

Dentro de los métodos de muestreo no destructivos, los utilizados con mayor frecuencia consisten en la remoción de tarugos radiales (probetas de incremento radial) o en la utilización de un instrumento denominado Pilodyn.

El método de muestreo citado más frecuentemente en la bibliografía para el análisis de la variación de las diferentes propiedades de la madera en sentido longitudinal, es la remoción de discos de diferentes alturas en el árbol. Para el estudio radial, es necesario que estos discos muestreados a diferentes alturas sean divididos de acuerdo al ancho de los anillos anuales de crecimiento o de

acuerdo a algún patrón de distancia entre la médula y la corteza. (Downes et al. 1997).

Existe un conflicto entre la necesidad de preservar el material genético evaluado y la de incrementar los conocimientos en las propiedades de la madera y las fibras (Raymond, 1995). Los métodos destructivos tienen la desventaja que provocan la pérdida del material evaluado y además tienden a ser más lentos y costosos. Por otra parte tienen la ventaja de que en general se obtiene una mejor representación de la totalidad del árbol. Los métodos no destructivos permiten conservar el material en evaluación y a la vez evaluar un elevado número de individuos por unidad de tiempo. Poseen la desventaja de lograr una pobre representación de la totalidad del fuste y en el caso del Pilodyn, solo mide los anillos externos, es sensible a la presencia de madera de reacción y cercanía a las ramas, y puede presentar variaciones entre estaciones (Downes et al. 1997).

### **2.3.1 Pilodyn**

El Pilodyn es una herramienta utilizada en el estudio de la densidad básica de árboles vivos a través de muestreo no destructivo. Este instrumento opera a través de la medición de la penetración de una aguja de acero en el árbol. La aguja de 2,5 milímetros de diámetro es impulsada con una fuerza inicial de 6 Joules. La profundidad alcanzada es inversamente proporcional a la densidad de la madera.

Cown (1978) comparando métodos para el análisis rápido de la densidad básica en árboles vivos, concluye que el método del Pilodyn era significativamente más rápido que los demás métodos de muestreo no destructivos. Obtuvo un coeficiente de correlación de -0,96 entre el valor de penetración y la media de la densidad de clones de *Pinus radiata* de 10 años de edad.

Da Silva Rosado y Brune (1983) estudiaron la correlación existente entre el método del Pilodyn y la densidad básica al DAP trabajando con *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* y *Eucalyptus citriodora*, éste último de 23 años de edad, y los 3 primeros a los 2 años de edad. Los autores verificaron que el modelo lineal simple es el que mejor se ajustó para todas las especies estudiadas. Reportaron precisiones medias en la estimación de la densidad al DAP y la densidad promedio en *Eucalyptus urophylla* ( $r^2 = 0,70$  y  $0,79$ , respectivamente) y *Eucalyptus grandis* ( $r^2 = 0,45$  y  $0,62$ , respectivamente),

y precisiones bajas en *Eucalyptus citriodora* ( $r^2 = 0,44$  y  $0,51$ , respectivamente) y *Eucalyptus saligna* ( $r^2 = 0,50$  y  $0,44$ , respectivamente). Los autores concluyen que el Pilodyn podrá ser utilizado con éxito en la selección masal de árboles en futuros programas de mejoramiento genético considerando la característica densidad básica, debido a la facilidad y rapidez de manipuleo y al consiguiente ahorro de tiempo.

Rockwood et al. (1995) encontraron que los valores de las lecturas del Pilodyn se correlacionaban medianamente con el valor del tarugo al DAP tanto para árboles fustales de 17 años de edad como para rebrotes de 16 años de edad. Los coeficientes de correlación reportados para los árboles originarios de semilla y para los rebrotes son de,  $-0,56$  y  $-0,42$  respectivamente.

Do Vale et al. (1995) obtuvieron correlaciones similares estudiando la relación entre la penetración del Pilodyn y la densidad básica promedio en árboles de 8 años de edad de *Eucalyptus grandis*, con un coeficiente de correlación de  $-0,55$ .

Raymond (1995), revisando las correlaciones genéticas y fenotípicas citadas en la bibliografía entre la penetración del Pilodyn y la densidad básica, señala valores de  $0,61$  a  $0,93$  y  $0,48$  a  $0,72$ , respectivamente, indicando que existe una fuerte correlación negativa entre ambos parámetros tanto a nivel genotípico como fenotípico.

En un estudio de correlación del Pilodyn con la densidad de la madera en árboles *Eucalyptus grandis* de 9-11 centímetros de DAP en Uruguay (localidad Tres Bocas), se obtuvieron valores de correlación del Pilodyn de  $-0,84$  y  $-0,81$  con la densidad del árbol promedio y la densidad al DAP respectivamente. Se concluyó que las medidas de Pilodyn podrían realizarse en cualquier época del año, ya que no hubo diferencias significativas entre las medidas de Pilodyn realizadas en diferentes estaciones del año (De León y Centurión, com. pers., 2000).

Estudios realizados recientemente por Gelid et al. (2001) en *Eucalyptus globulus ssp. globulus*, *Eucalyptus globulus ssp. maidenii* y *Eucalyptus dunnii* a edades de entre 4 y 6 años, señalan que la penetración del Pilodyn es independiente de la orientación de la toma de muestra, indicando que una única muestra por árbol resulta suficiente para obtener una buena estimación de la densidad básica. Reportan, para las 3 especies, altos valores de correlación (de  $-0,72$  a  $-0,94$ ) entre densidad básica y penetración del Pilodyn. Destacan que las correlaciones son más elevadas cuando se considera la densidad de la madera más cercana a la corteza.

Lopez et al. (2001), comparando familias de polinización abierta de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* a los 3 y 4 años de edad, obtuvieron valores de heredabilidad para la penetración del Pilodyn entre 0,43 y 0,52. Reportaron además que la correlación entre la penetración del Pilodyn y el crecimiento en diámetro es virtualmente 0. Concluyen que ambas características pueden ser mejoradas de manera independiente.

### **2.3.2 Determinación del punto óptimo de muestreo**

Este punto de muestreo debe ser un punto consistente en donde se de una alta correlación con la medida total del árbol. Las características que debería tener este punto se resumen a continuación: a) debe ser fácilmente alcanzado desde el suelo; b) encontrarse a una altura fija; c) poseer alta correlación entre el valor en este y el valor del árbol entero; d) debe ser robusto, ya que debería ser poco afectado por el cambio de sitios de crecimiento y edades (Downes et al. 1997).

Downes et al. (1997) afirman que el coeficiente de correlación entre el punto de muestreo y el valor determinado para el árbol entero debería ser un valor dentro del rango 0,7 y 0,85. Dependiendo del propósito del muestreo y del número total de muestras.

El éxito de algunas actividades como el mejoramiento de árboles, se basa en comprender como fluctúan los patrones de variación de las propiedades de la madera como función del crecimiento del árbol, con el objetivo de facilitar la predicción de las propiedades de la madera dentro del árbol entero a partir de solamente una muestra no destructiva.

Van der Sijde (1979) utilizando *Pinus caribea var. hondurensis* de 27 años de edad, analizó la correlación existente entre dos métodos de muestreo al DAP con la densidad del árbol entero. Concluyó que ambos métodos testeados, uno destructivo y uno no destructivo, daban buena correlación con el promedio del árbol (0,993 y 0,904 respectivamente).

Ferreira (1968,1970) citado por Brasil y Ferreira (1971) afirma que, para *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna* y *Eucalyptus grandis* de diferentes edades, la densidad básica promedio del árbol puede ser estimada a partir de muestras a nivel del DAP.

Brasil et al. (1979) citados por Barrichelo et al. (1983) reportan la posibilidad de estimar la densidad media del árbol a partir de la densidad determinada en discos muestreados del DAP, trabajando con *Eucalyptus grandis*. Para esta misma especie Barrichelo et al. (1980), citados por Barrichelo et al. (1983) arriban a conclusiones semejantes para muestras tomadas de poblaciones entre 5 y 10 años de edad.

Bhat et al. (1990) afirma que la densidad promedio del árbol podría ser estimada con razonable precisión usando los valores de densidad al DAP, excepto cuando se trata de árboles de edades muy tempranas como a los 3 años. En esta última la densidad de la base parecería ser un mejor estimador de la densidad promedio para *Eucalyptus grandis*, con un coeficiente de correlación de 0,73. Por otro lado, para las otras edades estudiadas los mayores valores de correlación se obtuvieron para el DAP, siendo los coeficientes de correlación de 0,90, 0,69 y 0,79 para las edades 5, 7 y 9 años respectivamente.

De Souza et al. (1986) estudiaron la correlación lineal de la media del árbol con cada una de las posiciones muestreadas (Base, DAP, 25%, 50%, 75% y 100%) en *Eucalyptus saligna* (2 procedencias) y *Eucalyptus grandis* (3 procedencias), ambos de 7 años de edad. Encontraron que las muestras tomadas en el 25 y 50% de la altura comercial presentaron los mayores valores de correlación para todas las procedencias estudiadas de ambas especies, indicando que estas alturas de muestreo estiman mejor la densidad del árbol y no el DAP como citan muchos otros autores. Estos resultados son confirmados por Bouvet y Bailleres (1995) trabajando con clones híbridos de *Eucalyptus urophylla x grandis* de aproximadamente 5 años y medio. Estos autores reportaron que la densidad promedio del árbol podría ser estimada a partir de un disco tomado a la altura comprendida entre el 25% y el 50% de la altura comercial. Para estas alturas obtuvieron los mayores valores de correlación 0,91 y 0,90 respectivamente.

En cuanto a la búsqueda de un punto óptimo de muestreo para longitud de fibra, la misma es muy escasa en la bibliografía. Uno de pocos estudios al respecto, es el de Bhat et al. (1990) quienes reportaron que la longitud de fibra al nivel de la base y del DAP presentaba baja correlación con el largo de fibra promedio del árbol entero. Para las cuatro edades estudiadas (3, 5, 7, y 9) el coeficiente de correlación se encontró en el rango de 0,09 a 0,64, para *Eucalyptus grandis*.

### **3 MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 MATERIALES**

##### **3.1.1 Instrumentos**

Los elementos utilizados fueron los siguientes:

- Balanza eléctrica de precisión (diezmilésima de gramo) marca Sauter.
- Deshumidificador
- Estufa de secado con circulación de aire. Marca Pablo Ferrando S.A.
- Pulidora de banda.
- Sierra sin-fin.
- Volumenómetro de Breuill.
- Cinta diamétrica
- Pilodyn

##### **3.1.2 Características del sitio y del material experimental**

La recopilación de la información del sitio es esencial y debería realizarse como una práctica de rutina en estudios de muestreo. De esta forma, al proporcionar esta información junto con los resultados publicados, cada investigador puede contribuir a generar una gran base de datos que ayude a comprender de forma global los factores que afectan las propiedades de la madera. (Downes et al, 1997).

Los Ensayos en los cuales se obtuvo el material experimental se encuentran ubicados según se detalla a continuación:

Localidad: Tres Bocas (Depto. Río Negro – Uruguay)  
Latitud: 32° 44´ Sur  
Longitud: 57° 51´ Oeste  
Altitud: 70-75 metros sobre el nivel del mar.

A continuación se presentan los diferentes factores que es necesario considerar sobre el área de emplazamiento de los ensayos y diseño de los mismos, ya que pueden afectar las tasas de crecimiento de los árboles y los patrones de crecimiento dentro del año.

### 3.1.2.1 Características climáticas

Entre las características ambientales, Malan (1994) señala a las precipitaciones como la única variable que posee un efecto significativo sobre la densidad básica en aquellos clones en que se observa una interacción genotipo x ambiente significativa para dicha propiedad.

En el siguiente cuadro se observa la distribución estacional y los totales anuales de precipitaciones para el período de crecimiento de los árboles muestreados. En el Anexo 1 se presentan los datos mensuales de precipitación y temperaturas máximas y mínimas.

**Cuadro N° 1. Distribución de las Precipitaciones (mm) durante el período de crecimiento de los ensayos.**

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1994	n/d	129	151	158 (*)	438		
1995	229	214	89	333	865		
1996	274	322	228	274	1098		
1997	191	236	145	740	1312		
1998	471	266	204	339	1280		
1999	513	185	176	95	969		
2000	303	695	388	342	1728		

(\*) No se dispone de la información correspondiente al mes de Diciembre.

Fuente: datos elaborados a partir de los registros de la estación meteorológica de El Rosario (Compañía Forestal Oriental S.A.), Localidad Tres Bocas, Departamento de Río Negro (Lat. 32° 44' S, Long. 57° 51' O).

### 3.1.2.2 Características edáficas y geológicas

Los rodales o ensayos de donde fueron extraídos los árboles se ubican geográficamente dentro de la unidad de suelos correspondiente a Tres Bocas según la carta de reconocimiento de suelos a escala 1:1.000.000 (Uruguay-MGAP, 1976). Los suelos pertenecen a la zona 9, Grupo CONEAT 09.3. Los suelos dominantes corresponden a Argisoles Dístricos y Brunosoles Subéutricos de baja y moderada fertilidad, siendo los primeros los más abundantes.

Los materiales geológicos que se encuentran en el área de estudio son: a) sedimentos limo arcillosos y aluviales de texturas variables; b) areniscas pertenecientes a la formación Salto. La formación Salto se caracteriza por ser un conjunto de depósitos arenosos, blandos, friables, de grano en general fino y silíceo, de coloración variable en la que predominan el rojo oscuro y pardos. Su grado de cementación en general es pobre y está determinado por un cemento ligeramente arcilloso. Hacia la base de la formación, se hallan materiales areno arcillosos de grano muy fino, silíceo (Bossi, 1969).

### 3.1.2.3 Características de los ensayos y del material leñoso

El material leñoso pertenece a 2 clones, uno de ellos es un clon de *Eucalyptus grandis* (X9) y el otro es un híbrido entre *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus camaldulensis* (X34). Ambos clones son procedentes de Sud Africa en donde éstos fueron seleccionados para ser introducidos al programa de mejoramiento de Compañía Forestal Oriental S.A. debido a su velocidad de crecimiento, sanidad y forma. Cuando fueron introducidos no se contaba con información en cuanto a las propiedades de la madera. La distribución del material experimental en los ensayos o rodales se presenta en el Cuadro N° 2.

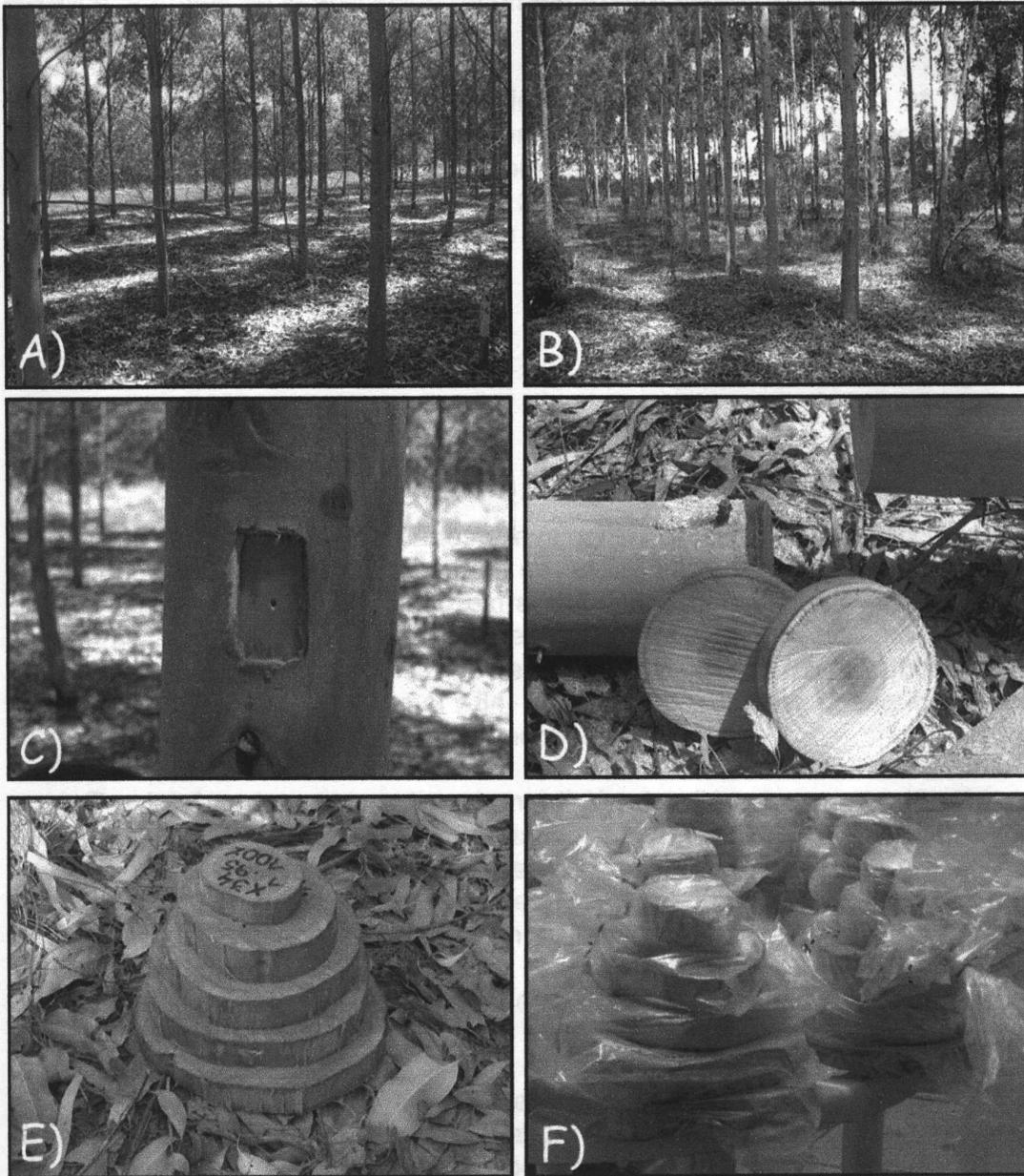
**Cuadro N° 2. Descripción de los Ensayos donde se realizó el muestreo.**

Abr-94	4 x 2,25	Ensayo 36	6,7 años
Abr-95	3 x 2	Ensayo 38	5,7 años
Mar-96	3 x 2	Ensayo 42	4,7 años
Oct-97	3 x 2	Ensayo 66	3,2 años
Oct-98	3 x 2	Plantación	2,2 años

Los clones x9 y x34 se encuentran representados en todas las edades, a excepción de la edad de 2,2 años, en la cuál solamente está representado el x9.

La forma de preparación de la tierra en el momento de la plantación fue muy similar en todos los ensayos y consistió en un laboreo en fajas de 1 metro de ancho. La preparación de la tierra consistió en: en primera instancia se realizó una pasada de subsolador, posteriormente se realizaron dos pasadas de excéntricas (diferidas en el tiempo). Por último una pasada de rotovador con el objetivo de afinar la tierra en la capa superficial.

En el período de plantación se procedió a la fertilización de los árboles.



**Figura N°1.** A) vista de ensayo clonal con 3,2 años de edad; B) Vista de ensayo clonal con 6,7 años de edad; C) Determinación al DAP del valor de penetración en árboles en pie de 3,2 años; D) Extracción de discos en clon híbrido (X 34); E) Discos extraídos a las diferentes alturas estudiadas para un mismo árbol del clon híbrido (X 34); F) Acondicionamiento individual de los discos en bolsas de polietileno.

En el período de plantación se procedió a la fertilización de todos los ensayos, a través de la aplicación de un fertilizante binario (20:40:0) a razón de 120 gramos por planta.

En relación al diseño experimental, los ensayos 36, 38 y 42 corresponden a bloques incompletos con 3 repeticiones y 5 árboles por parcela, el ensayo 66 corresponde a bloques completos al azar con 4 repeticiones y 16 árboles por parcela. Los árboles de 2,2 años de edad pertenecen a una plantación comercial de clones por lo que no sigue la forma de un diseño experimental.

## **3.2 METODOS**

### **3.2.1 Obtención del material leñoso**

Para cada una de las edades a evaluar se procedió a la selección de 5 individuos para cada clon. La selección se realizó basándose en características silvícolas y sanitarias, procurando extraer árboles relativamente homogéneos en cuanto a crecimiento y forma de fuste, descartando los árboles que presentaran problemas sanitarios. Se seleccionaron un total de 25 árboles para el clon X9 y de 20 árboles para el X34, ya que éste último no posee individuos de 2,2 años de edad (en plantación comercial).

Previo al apeo se procedía a la medición del diámetro con corteza de la Base y del DAP, utilizando una cinta diamétrica. Además se determinaban los valores de Pilodyn para estas dos alturas de muestreo. Para ello se procedía a la apertura de 3 "ventanas" igualmente espaciadas en cada altura de muestreo. La apertura de "ventanas" consistía en retirar la corteza con la ayuda de un martillo y una herramienta semejante a un sacabocado. De ésta forma se obtenía un rectángulo sin corteza, donde se iba a realizar la lectura del Pilodyn, sobre la madera (xilema).

Luego del apeo de los árboles seleccionados se procedía a la medición de la altura total y altura comercial. La altura comercial se define como la altura a la cual se alcanza un diámetro con corteza de 8 centímetros. Se le denomina altura comercial porque representa la región del árbol que posee valor comercial, y generalmente esta llega hasta el 70 % de la altura total del árbol.

Una vez medida la altura comercial se definió el resto de las alturas a muestrear, las cuales fueron definidas como proporciones de la primera. Las

alturas restantes fueron el 33% y el 66% de la altura comercial. Una vez determinadas estas alturas en el fuste se procedió a la medición de los diámetros con corteza faltantes (altura 33% y 66%) y a la apertura de las “ventanas” para la determinación de la penetración del Pilodyn. Se obtuvieron un total de 3 mediciones de penetración de Pilodyn por altura de muestreo.

Luego de haber realizado estas mediciones se procedió a la extracción de los discos con un espesor variable entre 4 y 6 centímetros. Antes de cortar los discos se debía inspeccionar con sumo cuidado el fuste del árbol apeado para detectar la presencia de defectos, ya que estos pueden contribuir a la aparición de anomalías en los datos. Evitar rama, nudos y deformaciones (como por ejemplo bifurcaciones) es más importante que tomar los discos a una altura exacta (Downes et al, 1997). Para casi todas las edades se obtuvieron 5 discos (alturas de muestreo por árbol) con excepción de la edad 2,2 para el X9 y la edad 3,2 del X34. Estas edades representaban para cada clon el límite inferior de las edades a estudiar, y esta reducción responde a la superposición de alturas porcentuales con la altura de muestreo fija (DAP).

Una vez obtenidos los discos estos eran acondicionados individualmente. Para ello se procedía a la identificación individual de los discos utilizando marcadores indelebles, considerando el clon, la edad, la altura de extracción y la repetición (de cual de los 5 árboles provenía la muestra). Luego de identificar cada disco, estos eran acondicionados dentro de bolsas de polietileno con el objetivo de que el contenido de humedad de los discos no descendiera por debajo del punto de saturación de las fibras, ya que por debajo de este punto comienzan las contracciones y rajaduras de los discos afectando la determinación de las propiedades de interés. Como reflejan Downes et al. (1997) al afirmar que los *Eucalyptus* son propensos al rajado y colapso, estos fenómenos alteran marcadamente las dimensiones transversales de las fibras y la densidad básica.

### **3.2.2 Trabajo de laboratorio**

#### **3.2.2.1 Determinación de la Densidad Aparente Básica**

Para la determinación de la densidad básica se realizaron probetas cúbicas de 20 milímetros de lado de acuerdo a la metodología prescrita por la Norma UNIT 237-1970.

Utilizando una sierra sinfin, se procedió a la apertura del disco obteniéndose un listón a lo largo del diámetro. De este se cortaron la misma cantidad de probetas de ensayo de cada sección radial, manteniendo siempre la distancia proporcional entre los cubos de un mismo radio, ya que los anillos de crecimiento no son diferenciados en esta especie (Hans, 1974; Wilkins, 1990). Para ello se procuró tomar el listón de zonas del disco que no presentaran defectos, como por ejemplo nudos, pudriciones o madera de reacción, cuyas características difieren de las de la madera "normal" por lo que esta estaría afectando el valor de las propiedades estudiadas.

El número de probetas a extraer depende del diámetro del disco, esto determina que en los discos próximos a la base el número de probetas sea mayor que en alturas superiores. Esto último representa un inconveniente para el análisis de los datos, ya que el diseño experimental no es ortogonal.

Una vez extraídas las probetas estas eran individualmente identificadas y nuevamente acondicionadas en bolsas de polietileno. Mediante la utilización de una pulidora de banda se procedió al pulido de las mismas. Todas las caras y las aristas de cada una de las probetas fueron pulidas para evitar la existencia de ángulos "vivos" los cuales podrían llegar a afectar la determinación del volumen de las probetas. Posteriormente se procedió al sellado de los poros para evitar la penetración de mercurio en la probetas y la consecuente subestimación del volumen. Para el sellado se procedió a sumergir los cortes transversales de las probetas en parafina líquida. Luego se retiró el exceso de parafina, con el objetivo de no sobreestimar el volumen de la probeta.

El volumen de la probeta fue determinado utilizando el volumenómetro de breuil con una precisión de 1 milímetro cúbico. Luego de eliminar cuidadosamente los restos de mercurio de las caras de las probetas, estas fueron pesadas y posteriormente acondicionadas en estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Al tercer día de estar las probetas en la estufa se realizó la primera medición del peso de las mismas. Las siguientes medidas del peso se realizaron día por medio hasta lograr una medida constante entre dos pesadas consecutivas.

Generalmente el proceso de secado hasta obtener el peso constante de la probeta se extendía a una semana. El lento período de secado estaría explicado por la presencia de parafina tapando los poros presentes en el corte transversal, esta se iría evaporizando paulatinamente a medida que avanzaban los días en la estufa. Todas las pesadas fueron realizadas mediante una balanza de precisión con aproximación al centígramo. Cada vez que las probetas eran retiradas de la estufa (para la realización de una pesada) eran colocadas en un deshumidificador para evitar que las probetas absorbieran humedad del ambiente.

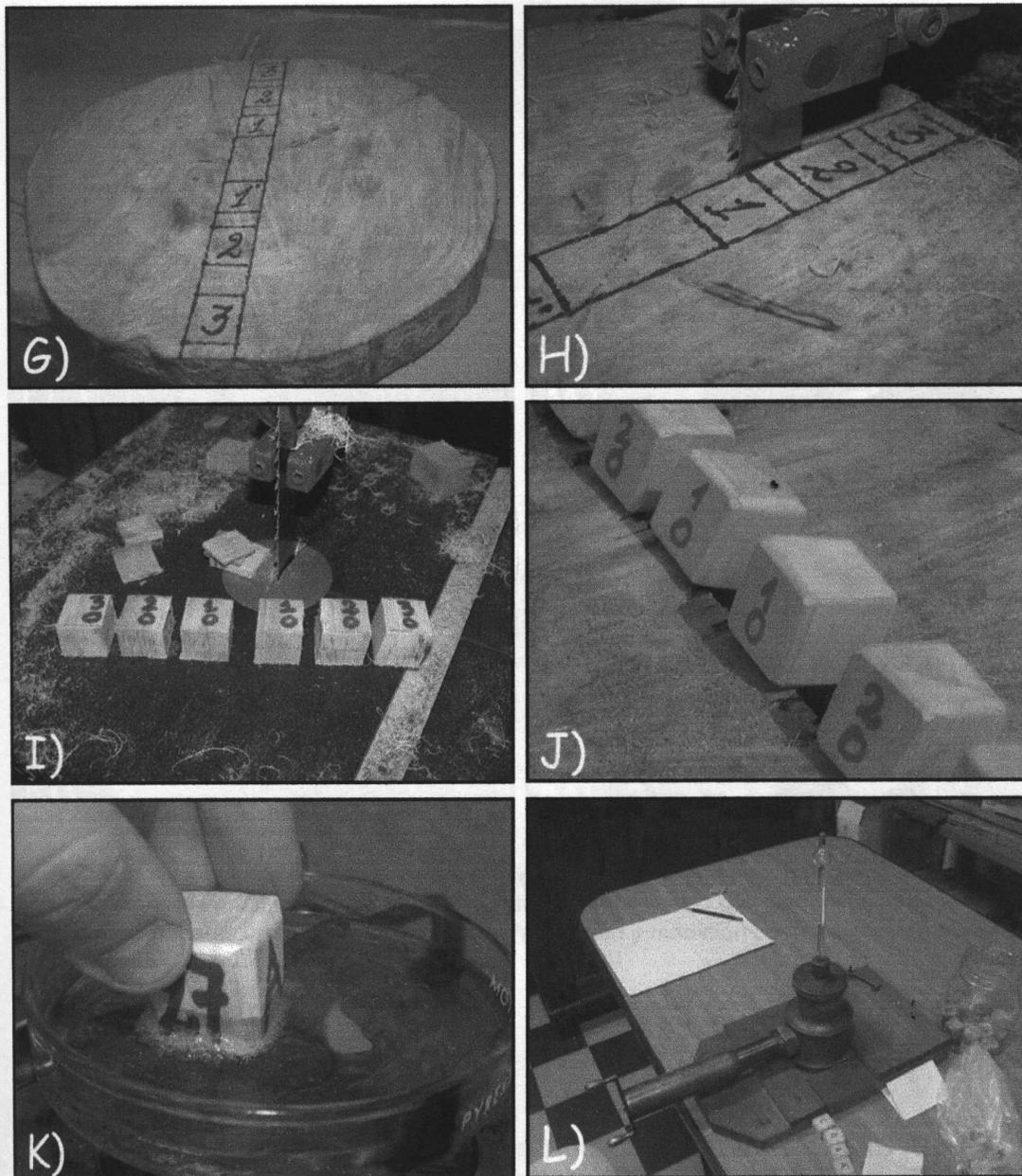
### 3.2.2.2 Determinación del Largo de fibra

Para determinar esta segunda propiedad de interés se procedió de la siguiente manera. A partir de las probetas de estudio de la densidad básica se cortaron astillas de madera, con un espesor de máximo 1 milímetro y largo variable. Estas astillas se colocaron en recipientes de vidrio a los cuales se les agregó licor de Jeffrey. Este licor está formado por partes iguales de ácido nítrico al 10 % y ácido crómico al 10 %. Todos los recipientes eran debidamente identificados. Dado que esta fase se llevó mayoritariamente a cabo a fines del verano no fue necesario la utilización de calor artificial para acelerar el proceso de degradación de la madera. Solamente con la temperatura ambiente se obtenía un buen resultado en los preparados realizados, luego de 24 horas. El tiempo de degradación de la madera por efecto del licor podría ser acelerado colocando los recipientes de vidrio en estufa, pero esta aceleración del proceso podría provocar una excesiva degradación de la madera.

Luego de dejar actuar al licor de Jeffrey durante 24 horas se extrajo el material degradado de los recipientes. Este era depositado sobre un porta objeto al cual previamente se le había colocado una o dos gotas de agua des-ionizada. Utilizando una pinza se ayudó a la disgregación del material leñoso, factor clave para una buena proyección de los preparados. Los preparados se caracterizaban por ser temporales o sea que su vida útil era muy limitada.

Una vez prontos los preparados se procedió a la proyección de los mismos en una pantalla, con la ayuda de un microproyector Leitz modelo Neo Promar. Antes de proyectar la imagen del preparado, se procedió a la calibración del mismo a través de la utilización de una reglilla graduada de 2 milímetros de longitud. Conociendo la medida (en centímetros) de la proyección de la reglilla se calculó la medida en milímetros de las fibras.

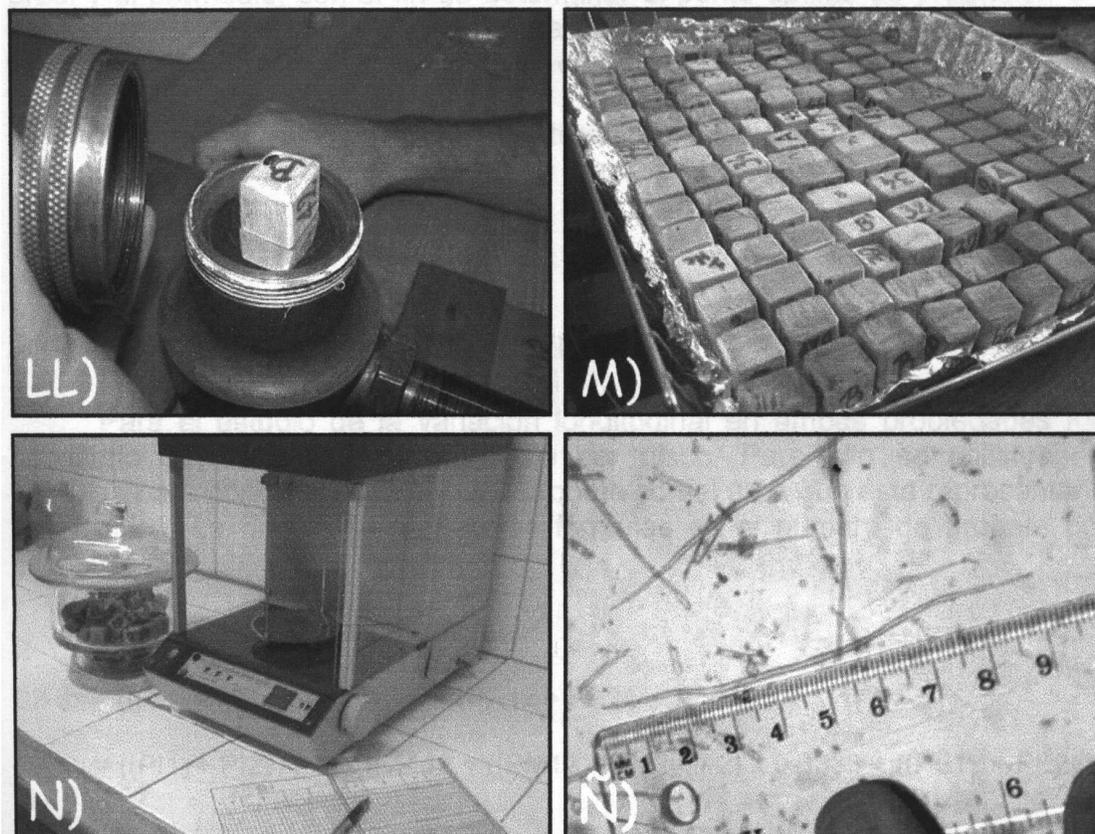
Basándose en información bibliográfica se comenzó midiendo 50 fibras enteras, es decir aquellas con ambos extremos bien definidos. Luego de obtener una importante cantidad de datos de fibras (aproximadamente 2700 medidas), se procedió al análisis de los mismos para determinar el número mínimo de fibras a medir necesario para que el error sea inferior al 10% de la media. Como resultado de este análisis se obtuvo que, para el error fijado, la medición de 5 fibras por preparado era suficiente. Por lo tanto se optó por medir un total de 10 fibras enteras por preparado.



de diferencias de medias (Tukey) para detectar diferencias estadísticamente

**Figura N° 2.** G) Marcación de probetas en disco, evitando defectos; H) Apertura del disco con la utilización de sierra sinfin; I) Probetas individuales de un mismo disco, los valores indican la altura de extracción del disco en el árbol y de la probeta en el diámetro; J) Probetas luego del pulido, tanto las caras como las aristas; K) Sellado de las caras transversales de las probetas con parafina; L) Volumenómetro de breuill.

cómo las correlaciones entre la densidad básica en las diferentes posiciones de árbol y el promedio, con el fin de determinar el punto crítico de madurez.



**Figura N° 3.** LL) Determinación del volumen de la probeta a través del desplazamiento de mercurio; M) Almacenamiento de probetas durante el secado; N) Medición del peso de probetas individuales, probetas en deshumidificador; Ñ) Proyección y medición de la longitud de las fibras sobre pantalla.

### **3.2.3 Procesamiento de los datos**

El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el SAS (Statistical Analysis System, 1996). Se realizaron diversos análisis de varianza y pruebas de diferencias de medias (Tukey) para detectar diferencias estadísticamente significativas entre las diversas fuentes de variación; edades, alturas, y posiciones radiales cuando fue posible.

Adicionalmente se determinaron las correlaciones entre los diferentes métodos de determinación de la densidad básica para cada clon y edad, así

como las correlaciones entre la densidad básica en las diferentes posiciones del árbol y el promedio, con el fin de determinar el punto óptimo de predicción del promedio. Se determinaron también las correlaciones entre las propiedades evaluadas (Densidad Básica y Longitud de Fibra).

Para explicar la variación en altura y en el diámetro de las diferentes propiedades en las distintas edades, se ajustaron modelos de regresión simple, lineales, cuadráticos o cúbicos.

### 3.2.3.1 Determinación de los valores promedio

Para el estudio de la variación longitudinal en ambas propiedades fue necesario obtener un valor promedio por disco. Para ello se utilizaron 2 fórmulas para ponderar el valor de la probeta con el área que ésta representaría en el disco. La diferencia para estas fórmulas es el número de probeta por diámetro.

Las fórmulas son las siguientes:

$$DB dx = ((PI1x + PI2x) / 2) \times 0.25 + ((PE1x + PE2x) / 2) \times 0.75 \quad (1)$$

$$DB dy = ((PI1y + PI2y) / 2) \times 0.1112 + ((PM1y + PM2y) / 2) \times 0.3336 + ((PE1y + PE2y) / 2) \times 0.5552 \quad (2)$$

En donde:

- DB dx, DB dy: Densidad básica promedio ponderada del disco x / y, en g/cm<sup>3</sup>;
- PI1/2 x/y: Densidad básica de la probeta interna, en g/cm<sup>3</sup>;
- PM1/2 x/y: Densidad de la probeta intermedia, en g/cm<sup>3</sup>;
- PE1/2 x/y: Densidad de la probeta externa, en g/cm<sup>3</sup>.

Los coeficientes corresponden al porcentaje del área de un círculo ocupada por cada una de las secciones. Para los discos que se obtuvieron dos probetas por sección radial se utilizó la fórmula (1), y para los discos en que se obtuvieron 3 probetas se utilizó la fórmula (2).

La densidad promedio por árbol se determinó a través de dos métodos. El primero consiste en un promedio aritmético de la densidad básica de los discos tomados a las diferentes alturas, y el segundo es un promedio ponderado de la densidad básica de los discos por el volumen del árbol. Esta

determinación se realizó con el objetivo de determinar la correlación existente entre ambos métodos de cálculo.

El promedio ponderado se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$DB \text{ prom} = \frac{[(DB_{\text{base}} + DB_{\text{dap}})/2] \cdot V_1 + [(DB_{\text{dap}} + DB_{33\%})/2] \cdot V_2 + \dots + [(DB_{86\%} + DB_{100\%})/2] \cdot V_4}{V_{sc}} \quad (3)$$

En donde:

- $DB \text{ prom}$ : Densidad básica promedio ponderada del árbol  $i$ , en  $\text{g/cm}^3$ ;
- $DB_i$ : Densidad básica del disco  $i$ , en  $\text{g/cm}^3$ ;
- $V_i$ : Volumen sin corteza de la troza  $i$ , en  $\text{m}^3$ ;
- $V_{sc}$ : Volumen comercial sin corteza del árbol  $i$ , en  $\text{m}^3$ .

Los volúmenes utilizados en la fórmula corresponden a las trozas definidas por dos alturas de muestreo consecutivas. El volumen comercial considera un diámetro mínimo de 8 cm con corteza. Los volúmenes por troza se calcularon utilizando la fórmula de Smalian.

## 4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las diferentes propiedades estudiadas. En primera instancia se presentan los resultados obtenidos en el estudio de la densidad básica entre edades y posiciones utilizando la Norma UNIT 237-70. Posteriormente se exponen los resultados de las determinaciones realizadas con el Pilodyn, su correlación con la densidad básica, y una aproximación a su punto óptimo de determinación. Luego se incorporan los resultados del estudio de longitud de fibra y su variación, así como las correlaciones entre ambas propiedades de la madera evaluadas.

### 4.1 DENSIDAD BASICA

#### 4.1.1 Variación entre clones y edades

A continuación se presentan los cuadros y gráficos que describen la evolución de la densidad básica con la edad para ambos clones.

**Cuadro N° 3. Densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para el clon X9 en función de la edad.**

Edad	N°	Media	IC*	
			Lim inf	Lim sup
2,2	22	<b>0,4290</b>	0,4130	0,4450
3,2	25	<b>0,4346</b>	0,4240	0,4450
4,7	25	<b>0,4381</b>	0,4290	0,4470
5,7	25	<b>0,4513</b>	0,4370	0,4660
6,7	25	<b>0,4872</b>	0,4660	0,5080

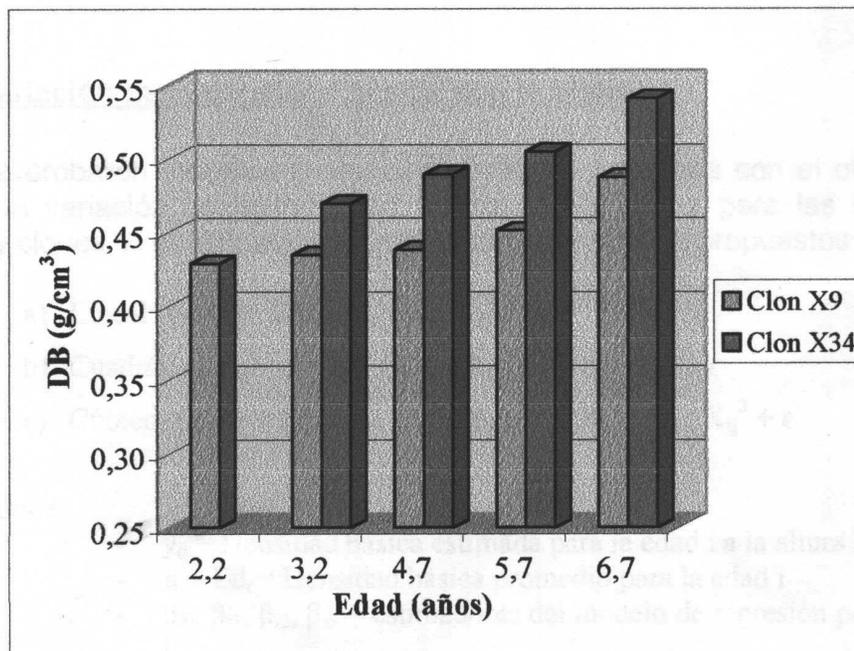
\* Intervalo de 95% de confianza (IC) para la media

**Cuadro N° 4. Densidad básica promedio (g/cm<sup>3</sup>) para el clon X34 en función de la edad.**

Edad	N°	Media	IC *	
			Lim inf	Lim sup
3,2	20	0,4695	0,4530	0,4860
4,7	25	0,4893	0,4800	0,4990
5,7	25	0,5045	0,4950	0,5140
6,7	25	0,5406	0,5334	0,5470

\* Intervalo de 95% de confianza (IC) para la media

**Gráfico N° 1. Evolución de la densidad básica en función de la edad.**



Los datos de densidad básica corresponden a las densidades promedio aritméticas calculadas a partir de todas las posiciones y árboles dentro de cada clon y edad, sin ser ponderados por el volumen.

El análisis de varianza encontró diferencias significativas ( $P \leq 0,01$ ) entre edades para ambos clones.

Estos resultados indican que la densidad básica promedio de los árboles tendería a aumentar con la edad en ambos clones. Ninguno de los clones muestra tendencias a la estabilización de la densidad básica dentro del rango de edades estudiado.

En ambos clones la densidad básica presenta bajos valores de coeficiente de variación, siendo de 6,84 y 4,26%, para los clones X9 y X34 respectivamente.

Como indican los intervalos de confianza para la densidad básica promedio por edad, para el clon X9, no existen diferencias significativas en el rango de edades entre 2,2 y 5,7 años. La edad 6,7 difiere significativamente del rango de edades entre 2,2 y 4,7. Para el caso del clon X34 la variación de la densidad básica con la edad es más acentuada, mostrando diferencias significativas entre la mayor parte de las edades estudiadas (Cuadro N° 4).

#### **4.1.2 Variación de la densidad básica con la altura**

Se probaron modelos lineales, cuadráticos y cúbicos con el objetivo de explicar la variación de la densidad básica con la altura para las diferentes edades y clones. A continuación se presentan los modelos propuestos:

- a) Lineal:  $\hat{y}_{ij} = \mu + Ed_i + \beta_{i0} + \beta_{i1} \cdot X_{ij} + \epsilon$
- b) Cuadrático:  $\hat{y}_{ij} = \mu + Ed_i + \beta_{i0} + \beta_{i1} \cdot X_{ij} + \beta_{i2} \cdot X_{ij}^2 + \epsilon$
- c) Cúbico:  $\hat{y}_{ij} = \mu + Ed_i + \beta_{i0} + \beta_{i1} \cdot X_{ij} + \beta_{i2} \cdot X_{ij}^2 + \beta_{i3} \cdot X_{ij}^3 + \epsilon$

Donde:

- $\hat{y}_{ij}$  = Densidad básica estimada para la edad  $i$  a la altura  $X_{ij}$
- $\mu + Ed_i$  = Densidad básica promedio para la edad  $i$
- $\beta_{i0}, \beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}$  = estimadores del modelo de regresión para la edad  $i$
- $X_{ij}$  = altura de muestreo para el árbol  $j$  de edad  $i$ .
- $\epsilon$  = error experimental

A continuación se presentan los estimadores de los parámetros y niveles de significancia del modelo de regresión que mejor se ajusta al comportamiento de la densidad básica, para cada uno de los clones en función de la altura en las diferentes edades evaluadas.

**Cuadro N° 5. Estimadores de los modelos de regresión de la densidad básica en función de la altura por clon según la edad.**

CLON	EDAD	MODELO	ESTIMADORES			
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
X9	2,2	Lineal	0,4565	-0,0220		
	Signif	(0,0035)	(<0,0001)	(0,0035)		
	3,2	Cúbico	0,4514	-0,0436	0,016	-0,0014
	Signif	(0,0123)	(<0,0001)	(0,0108)	(0,0371)	(0,1115)
	4,7	Cúbico	0,4562	-0,0352	0,0072	-0,0004
Signif	(<0,0001)	(<0,0001)	(<0,0001)	(<0,0001)	(<0,0001)	
5,7	Cúbico	0,4838	-0,0508	0,0104	-0,0005	
Signif	(0,0005)	(<0,0001)	(<0,0001)	(0,0001)	(0,0004)	
6,7	Cúbico	0,5119	-0,0398	0,0062	-0,0002	
Signif	(0,0082)	(<0,0001)	(0,0117)	(0,0289)	(0,0777)	
X34	3,2	Ninguno				
	4,7	Cúbico	0,4913	-0,0241	0,0072	-0,0005
	Signif	(<0,0001)	(<0,0001)	(0,0022)	(0,0007)	(0,0016)
	5,7	Cúbico	0,5086	-0,0194	0,0042	-0,0002
Signif	(0,0006)	(<0,0001)	(0,0095)	(0,0132)	(0,0355)	
6,7	Cuadrático	0,5484	-0,0062	0,0005		
Signif	(0,0303)	(<0,0001)	(0,0139)	(0,0091)		

Como se observa en el cuadro anterior solamente la edad 3,2 del clon X34 no se ajustó a ninguno de los modelos propuestos. Para el caso del clon X9 todas las edades, salvo la de 2,2 años se ajustaron a modelos cúbicos. El comportamiento lineal decreciente de la densidad básica con la altura para la edad 2,2 se correspondería con las fases decrecientes iniciales de los modelos cúbicos ajustados para las edades superiores.

Los modelos que mejor se ajustaron a la variación de la densidad básica con la altura para el clon X34 fueron también cúbicos, salvo para la edad de 6,7 años donde el comportamiento es de tipo cuadrático. Para todas las edades en que se ajustó algún modelo, el ajuste resultó altamente significativo.

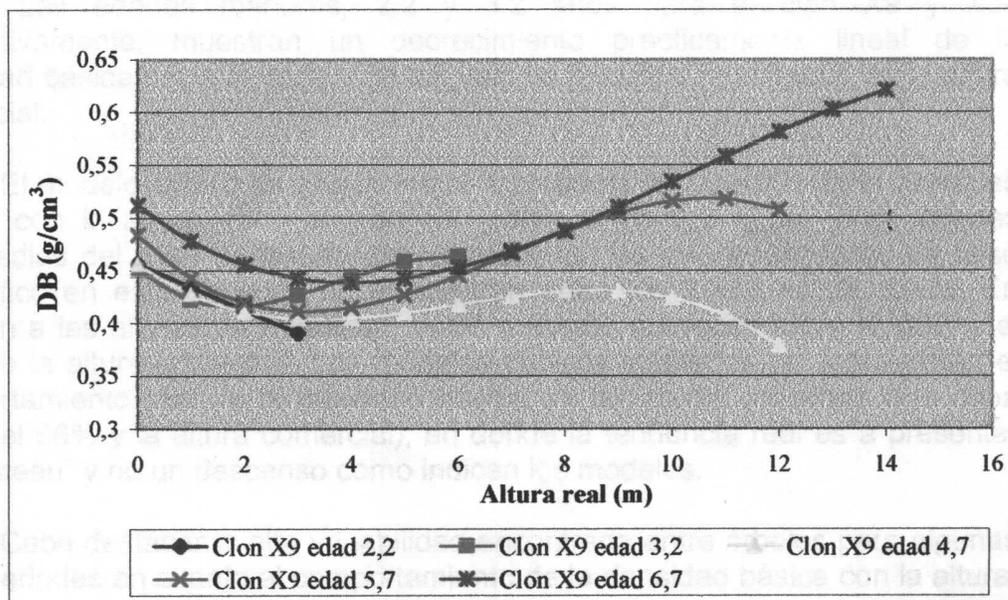
**Cuadro N° 6. Densidad básica promedio (g/cm<sup>3</sup>) para las diferentes alturas de muestreo por clon según la edad.**

Clon	Edad	Alturas				
		Base	Dap	33%	66%	100%
X9	2,2	0,4660	0,4020	0,4385	0,4080	0,4130
	3,2	0,4524	0,4136	0,4224	0,4340	0,4507
	4,7	0,4589	0,4165	0,4111	0,4481	0,4556
	5,7	0,4868	0,4280	0,4158	0,4624	0,4633
	6,7	0,5215	0,4509	0,4552	0,4690	0,5395
X34	3,2	0,4888	0,4737	0,4543		0,4613
	4,7	0,4901	0,4759	0,4676	0,5064	0,5066
	5,7	0,5136	0,4797	0,4917	0,5093	0,5283
	6,7	0,5531	0,5373	0,5276	0,5400	0,5451

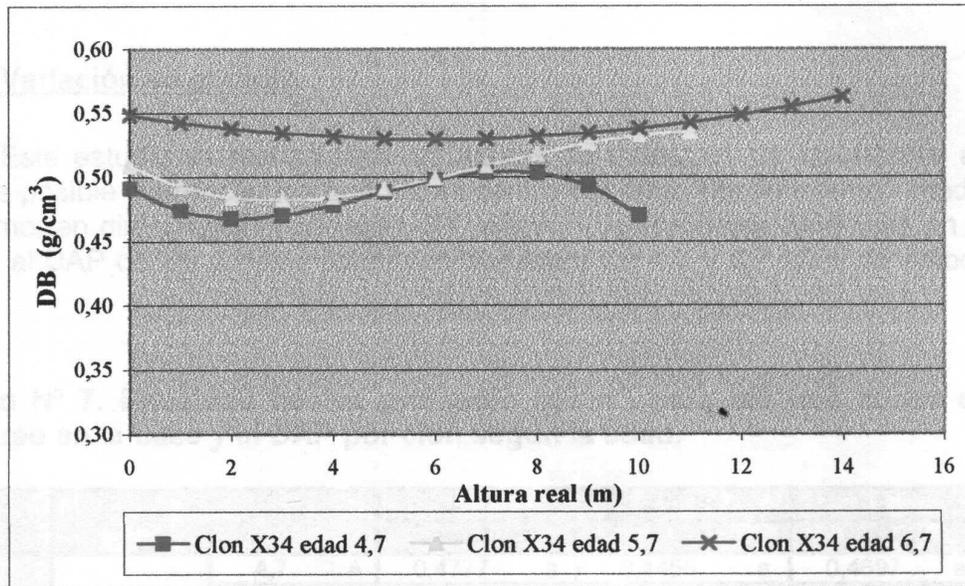
Los valores presentados en el cuadro anterior corresponden a los promedios de los cinco discos (cinco árboles) por altura de muestreo, para cada clon, los mismos datos a partir de los cuales se ajustaron los diferentes modelos de regresión.

Para la edad de 2,2 años en clon X9 y 3,2 años en el X34, el 33% de la altura se encuentra por debajo de la altura fija de muestreo al DAP.

**Gráfico N° 2. Modelos ajustados para la densidad básica en función de la altura real por edad para el clon X9.**



**Gráfico N° 3. Modelos ajustados para la densidad básica en función de la altura real por edad para el clon X34.**



Como se observa en los gráficos N° 2 y 3 y en el cuadro N° 6, no todas las edades muestran el mismo comportamiento de la densidad básica con la altura. Las edades menores, 2,2 y 3,2 años para el clon X9 y X34 respectivamente, muestran un decrecimiento prácticamente lineal de la densidad básica hacia la copa, con los valores mínimos registrados en la altura comercial.

El modelo cúbico es el que mejor representa la variación de la densidad básica con la altura, para el clon X9 (salvo a los 2,2 años) y las edades intermedias del X34. Considerando los modelos, los valores mínimos de peso específico en estas edades se encuentran entre los 2 y 4 m. de altura. En relación a las alturas de muestreo, estos mínimos aparecen entre el DAP y el 33% de la altura comercial. Los modelos cúbicos ajustados no representan el comportamiento real de la densidad básica en las zonas próximas a la copa (entre el 66% y la altura comercial), en donde la tendencia real es a presentar un "plateau" y no un descenso como indican los modelos.

Cabe destacar la alta variabilidad encontrada entre árboles para algunas de las edades en cuanto al comportamiento de la densidad básica con la altura,

más aún si se considera el origen clonal de los mismos. En el Anexo N° 2 se presentan los gráficos para los árboles individuales.

#### 4.1.3 Variación en el radio

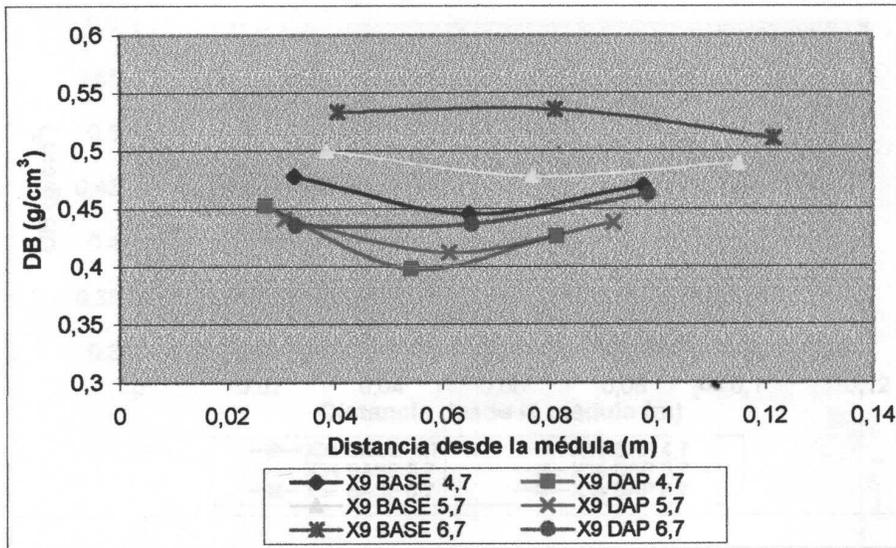
Este estudio se realizó para las alturas de muestreo de los árboles en que fue posible diferenciar las tres zonas dentro del disco (tercio interno, medio y externo, en dirección a la corteza). Se utilizaron las probetas obtenidas en la base y al DAP de los árboles comprendidos entre los 4,7 y 6,7 años de ambos clones.

**Cuadro N° 7. Densidad básica promedio (g/cm<sup>3</sup>) para las tres zonas de muestreo en la base y al DAP por clon según la edad.**

Clon	Altura	Edad		Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> )					
		Edad	Clase	Base		Medio		Externo	
X 9	Base	4,7	A	0,4777	a	0,4455	a	0,4697	a
		5,7	A	0,5001	a	0,4782	a	0,4892	a
		6,7	B	0,5333	a	0,5356	a	0,5106	a
	DAP	4,7	A	0,4526	a	0,3980	a	0,4263	a
		5,7	A	0,4412	a	0,4122	a	0,4348	a
		6,7	A	0,4355	a	0,4367	a	0,4625	a
X 34	Base	4,7	A	0,4869	a,b	0,4676	a	0,5067	b
		5,7	A	0,4789	a	0,4929	a	0,5330	b
		6,7	B	0,5081	a	0,5597	b	0,5581	b
	DAP	4,7	A	0,4803	a,b	0,4217	a	0,5136	b
		5,7	A	0,4413	a	0,4625	a,b	0,4925	b
		6,7	B	0,4937	a	0,5340	b	0,5480	b

Medias seguidas por letras mayúsculas y minúsculas diferentes difieren a un nivel de probabilidad de 5 y 10 % respectivamente. Letras mayúsculas comparan a las diferentes edades por clon según altura (verticalmente). Las minúsculas comparan las posiciones radiales por edad y altura de muestreo (horizontalmente).

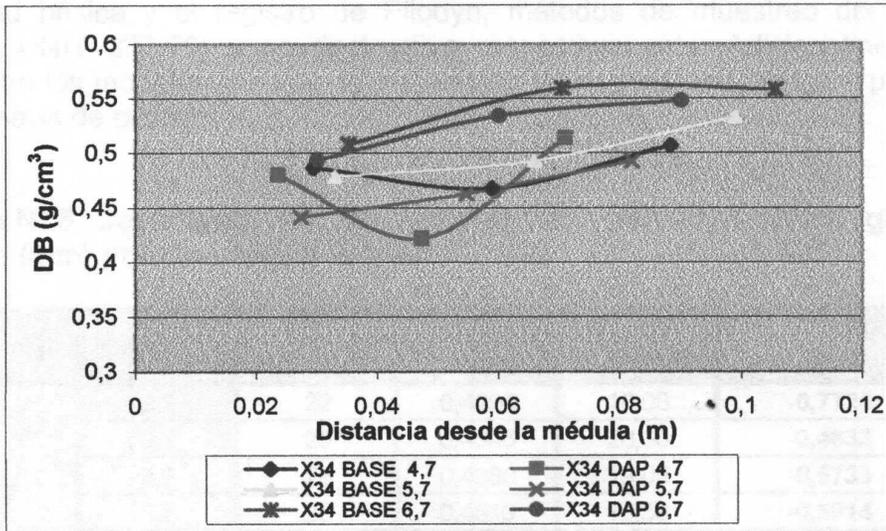
**Gráfico N° 4. Variación radial de la densidad básica según la edad para el Clon X9.**



Para el clon X9, la prueba de Tukey encontró diferencias significativas entre edades en la base del árbol ( $P < 0,01$ ). Por otro lado, no detectó diferencias significativas entre zonas, ni efectos de interacción significativos entre edades y zonas. La densidad básica para las edades de 4,7 y 5,7 no difiere significativamente, pero ambas difieren de la edad 6,7 con un 95% de confianza.

Por otro lado, al DAP las diferencias entre edades y zonas no resultaron estadísticamente significativas al 5%. A modo de tendencia, la densidad básica muestra un descenso desde la médula hacia la zona intermedia para luego aumentar hacia la zona externa. Este comportamiento se presenta tanto en la base como al DAP a los 4,7 y 5,7 años, mientras que el comportamiento a los 6,7 es más complejo, sin cambios importantes entre la zona interna e intermedia, y con un descenso o aumento posterior según la altura (base y DAP respectivamente).

**Gráfico N° 5. Variación radial de la densidad básica según la edad para el Clon X34.**



En el caso del clon X34 existen claras diferencias significativas entre edades ( $P \leq 0,01$ ) y zonas radiales ( $P \leq 0,05$ ) para ambas alturas de muestreo. Tanto en la base como al DAP, la densidad básica a las edades de 4,7 y 5,7 años, es significativamente inferior que a los 6,7 años. Generalmente, la zona interna y media difieren significativamente de la zona externa en ambas alturas de muestreo. El comportamiento radial de la densidad básica para el clon X34 es diferente que para el clon X9. En la edad 4,7 la densidad básica tiende a disminuir desde la zona interna a la media, para luego aumentar hacia la zona exterior. Por otro lado, para las edades de 5,7 y 6,7 años la tendencia es a aumentar desde la zona interna hacia la externa. En la edad de 6,7 años este aumento es rápido desde la zona interna a la media y luego se estabiliza en dirección a la zona exterior.

En prácticamente todos los casos, las densidades obtenidas en la base superan a las correspondientes a las mismas posiciones a nivel del DAP.

#### 4.1.4 Resultados obtenidos utilizando el Pilodyn

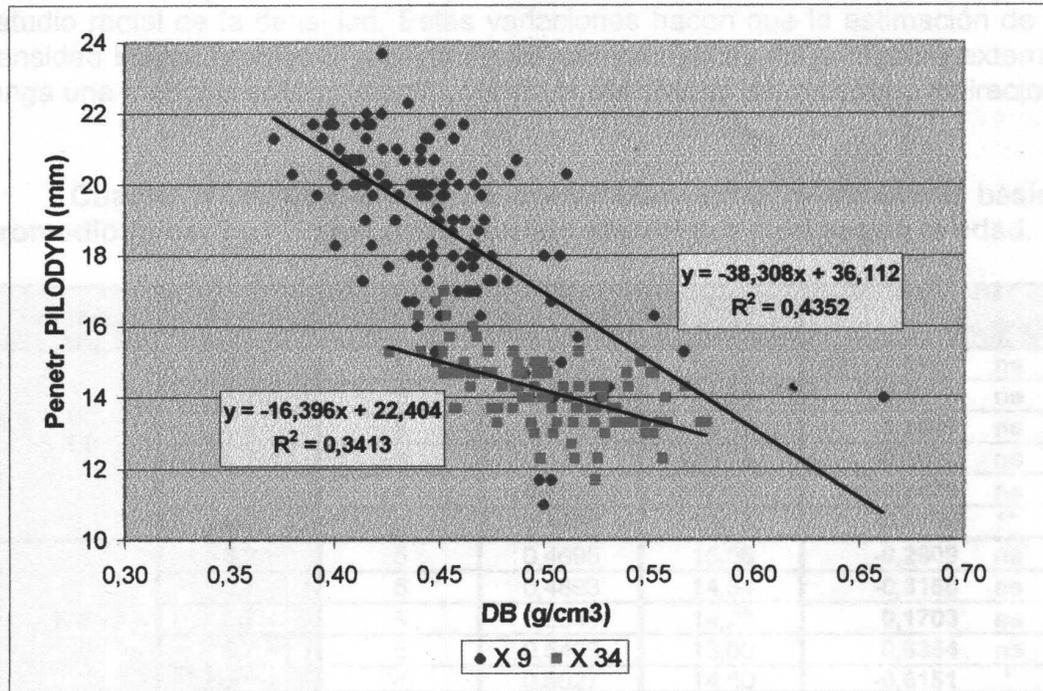
A continuación se presentan los niveles de correlación entre el valor de densidad básica y el registro de Pilodyn, métodos de muestreo destructivo (Norma UNIT 237-70) y no destructivo respectivamente. Adicionalmente se presentan los modelos lineales de estimación de la densidad básica a partir de los registros de pilodyn.

**Cuadro N° 8. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm<sup>3</sup>) y Pilodyn (mm) por clon según la edad.**

Clon	Edad	N	DB Promedio	Pilodyn Promedio	Correlación
X 9	2,2	22	0,4290	19,08	-0,7725 ****
	3,2	25	0,4346	20,60	-0,4632 **
	4,7	25	0,4380	19,08	-0,5733 ***
	5,7	25	0,4513	18,50	-0,5914 ***
	6,7	25	0,4872	17,42	-0,7359 ****
	Todas	122	0,4485	18,93	-0,6597 ****
X 34	3,2	20	0,4695	15,20	-0,4310 *
	4,7	25	0,4893	14,35	-0,3054 ns
	5,7	25	0,5045	13,67	-0,3789 *
	6,7	25	0,5406	13,63	-0,2825 ns
	Todas	95	0,5027	14,16	-0,5842 ****

+ ns, no significativo; \* significativo al nivel de probabilidad de 10 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 5 %; \*\*\* significativo al nivel de probabilidad de 0,5 %; \*\*\*\* significativo al nivel de probabilidad de 0,01 %.

**Gráfico N° 6. Correlación entre la densidad básica (g/cm<sup>3</sup>) y Pilodyn (mm) por clon.**



En términos generales, los resultados indican una elevada correlación inversa entre ambas técnicas de medición, con valores de  $-0,66\%$  y de  $-0,58$ , para los clones X9 y X34, respectivamente.

Los datos de correlación para el clon X9, desglosados por edad, indican una mayor correlación para la menor y la mayor edad (2,2 y 6,7 años). El elevado valor de correlación para la edad 2,2 estaría explicado por estar formada casi exclusivamente por la proporción de madera evaluada con el Pilodyn. En las edades intermedias hay una cierta proporción de madera en la parte interior del árbol con características diferentes a la madera exterior, esta última es la madera evaluada con el Pilodyn. Sería por esta razón que los valores de correlación descienden, al no considerar la madera interior del tronco con características diferentes a la madera evaluada por el Pilodyn. A medida que los árboles avanzan en edad, van generando en sentido radial madera con características más similares a la madera de la periferia, la cual es evaluada por el Pilodyn. El incremento en la proporción de madera más homogénea estaría explicando el incremento en la correlación hacia la edad superior.

En cuanto al clon X34, los niveles de correlación obtenidos son claramente inferiores a los del clon X9. Estas bajas correlaciones, incluso no significativas para algunas edades, estarían explicadas por una mayor variación radial de las propiedades de la madera en el clon híbrido, como lo indicara el estudio radial de la densidad. Estas variaciones hacen que la estimación de la densidad básica promedio, a partir de las características de la madera externa, tenga una menor precisión, disminuyendo la efectividad del muestreo indirecto.

**Cuadro N° 9. Coeficiente de correlación entre la densidad básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) y Pilodyn (mm) medido al DAP por clon según la edad.**

Clon	Edad	N	DB Promedio	Pilodyn DAP	Correlación
X 9	2,2	5	0,4290	19,58	<b>-0,6720 ns</b>
	3,2	5	0,4346	21,56	<b>-0,6216 ns</b>
	4,7	5	0,4380	20,20	<b>-0,3519 ns</b>
	5,7	5	0,4513	19,28	<b>-0,0902 ns</b>
	6,7	4	0,4836	17,58	<b>-0,3479 ns</b>
	Todos	24	0,4458	19,73	<b>-0,6780 **</b>
X 34	3,2	5	0,4695	15,58	<b>-0,2909 ns</b>
	4,7	5	0,4893	14,54	<b>-0,3155 ns</b>
	5,7	5	0,5045	14,26	<b>0,1703 ns</b>
	6,7	5	0,5406	13,60	<b>0,6854 ns</b>
	Todos	20	0,5027	14,50	<b>-0,6151 *</b>

+ ns, no significativo; \* significativo al nivel de probabilidad de 1 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 0,1 %.

En el cuadro N° 9 se presentan las correlaciones existentes entre los registros de Pilodyn promedio al DAP y la densidad básica promedio aritmética por árbol. Se consideró la zona del DAP por ser el punto de muestreo comúnmente utilizado en las determinaciones de la densidad básica empleando el Pilodyn.

Para ambos clones existe una correlación alta y negativa entre ambas variables. Cuando se consideran todos los registros por clon, las correlaciones resultan altamente significativas.

Al considerar separadamente las diferentes edades, el bajo número de muestras (5 árboles por edad y clon) determina que las correlaciones no sean significativas, y en algunos casos adquieren valores positivos.

**Cuadro N° 10. Coeficiente de correlación entre la densidad básica promedio (g/cm<sup>3</sup>) por zona y penetración del Pilodyn (mm) para ambos clones.**

Clon	Zona radial	n	Correlación
X9	Interna	26	-0,6126 ***
	Media	26	-0,7327 ***
	Externa	26	-0,6803 ***
X34	Interna	24	-0,2960 ns
	Media	24	-0,4157 **
	Externa	24	-0,3484 *

+ ns, no significativo; \* significativo al nivel de probabilidad de 10 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 5 %; \*\*\* significativo al 0,1 %.

En el cuadro anterior se presentan las correlaciones obtenidas entre la densidad y la penetración del Pilodyn según zonas radiales. Para el clon X9 se obtuvieron correlaciones negativas altamente significativas para las tres posiciones. En el caso del clon X34, la correlación con la zona interna no es significativa. Para las posiciones intermedia y externa las correlaciones poseen una significancia moderada.

#### **4.1.5 Punto óptimo de muestreo**

Para la estimación del punto óptimo de muestreo se determinaron las correlaciones existentes entre los valores de densidad básica de los diferentes puntos de muestreo y el valor promedio aritmético del árbol.

Se utilizó como valor promedio del árbol el promedio aritmético de todos los puntos de muestreo evaluados. Previamente se estudió la asociación existente entre los valores promedio aritmético y el promedio ponderado por el volumen.

Se obtuvo una correlación altamente significativa (valores superiores a 0.97) para el rango de edades estudiado, exceptuando la edad 6,7 del clon X9, para la cual la correlación desciende a 0,67. Por este motivo, el punto óptimo de muestreo para dicha edad se determinará en relación a la densidad básica promedio ponderado. Estos resultados facilitan la determinación de la densidad promedio ya que no sería necesario realizar una ponderación volumétrica de las zonas de muestreo.

En el Cuadro N°11 se presentan los puntos que mejor representan los valores promedio por árbol para cada una de las edades así como los valores de correlación con el promedio.

**Cuadro N° 11. Puntos óptimos de estimación y niveles de correlación de la densidad básica promedio (g/cm<sup>3</sup>) del árbol.**

Clon	Edad	N	Punto Óptimo	Altura (m)	Correlación
X 9	2,2	5	Base / 33%	0,3 / 0,75	0,9564*** / 0,9623***
	3,2	5	Dap / 66%	1,3 / 3,6	0,9094** / 0,9672 ***
	4,7	5	Dap / 33%	1,3 / 3,9	0,9806**** / 0,9151**
	5,7	5	Base / Dap	0,3 / 1,3	0,8094* / 0,8910**
	6,7	5	Base	0,3	0,9870****
X 34	3,2	5	Base / 33% / Dap	0,3 / 0,82 / 1,3	0,952*** / 0,9788**** / 0,9068 **
	4,7	5	33% / 100%	2,8 / 8,3	0,8071* / 0,9296****
	5,7	5	33% / 66 %	3,7 / 7,3	0,7650* / 0,9332***
	6,7	5	Base / 100%	0,3 / 12,0	0,9918**** / 0,847**

+ \* significativo al nivel de probabilidad de 10 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 5 %; \*\*\* significativo al nivel de probabilidad de 1 %; \*\*\*\* significativo al nivel de probabilidad de 0,1 %.

En el caso del clon X9, para el intervalo de edades entre 3,2 y 5,7 la densidad básica al DAP está altamente correlacionada con los valores de densidad promedio. Por otro lado a la edad de 2,2 las zonas de muestreo por debajo del DAP representan mejor la densidad promedio del árbol. En la edad superior (6,7 años) la densidad en la base es la única que se correlacionó significativamente con los valores promedio.

Para el Clon X34, la densidad al DAP no se correlaciona significativamente con la densidad promedio, salvo para la edad de 3,2 años. En las restantes edades son la densidad en la base y al 33% de la altura comercial las que mejor representan los valores de densidad promedio por árbol.

**Cuadro N° 12. Puntos óptimos de determinación de la penetración del Pilodyn en función del nivel de correlación con la densidad básica promedio del árbol.**

Clon	Edad	N	Punto Óptimo	Altura real (m)	Correlación r <sup>2</sup> *
X 9	2,2	5	66% / 100%	1,9 / 2,4	-0,9309*** / -0,8899**
	3,2	5	33%	1,8	0,6946 ns
	4,7	5	100%	11,7	-0,7478*
	5,7	5	Base	0,3	-0,7514*
	6,7	5	Base	0,3	0,6845 ns
X 34	3,2	5	100%	2,4	-0,8969**
	4,7	5	66%	5,5	-0,5982 ns
	5,7	5	33% / 100%	3,7 / 11,0	-0,8867** / -0,7745*
	6,7	5	33%	4,0	-0,9338***

+ ns no significativo; \* significativo al nivel de probabilidad de 10 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 5 %; \*\*\* significativo al nivel de probabilidad de 1 %.

Según los datos presentados en el cuadro N°12, la penetración del Pilodyn medida a nivel del DAP no constituye un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad básica promedio del árbol. Para realizar generalizaciones en cuanto al punto óptimo de determinación de la penetración del Pilodyn, sería conveniente contar con un mayor número de repeticiones.

## 4.2 LARGO DE FIBRA

### 4.2.1 Variación con la edad

A continuación se presentan los cuadros y gráficos que representan la variación del Largo de Fibra con la edad para ambos clones estudiados.

**Cuadro N° 13. Largo de fibra (mm) para el clon X9 en función de la edad.**

Edad	N	Media	IC *	
			Lim inf	Lim sup
2,2	15	<b>0,828</b>	0,783	0,873
3,2	15	<b>0,944</b>	0,914	0,974
4,7	15	<b>0,951</b>	0,927	0,976
5,7	15	<b>0,927</b>	0,871	0,983
6,7	15	<b>0,959</b>	0,915	1,004

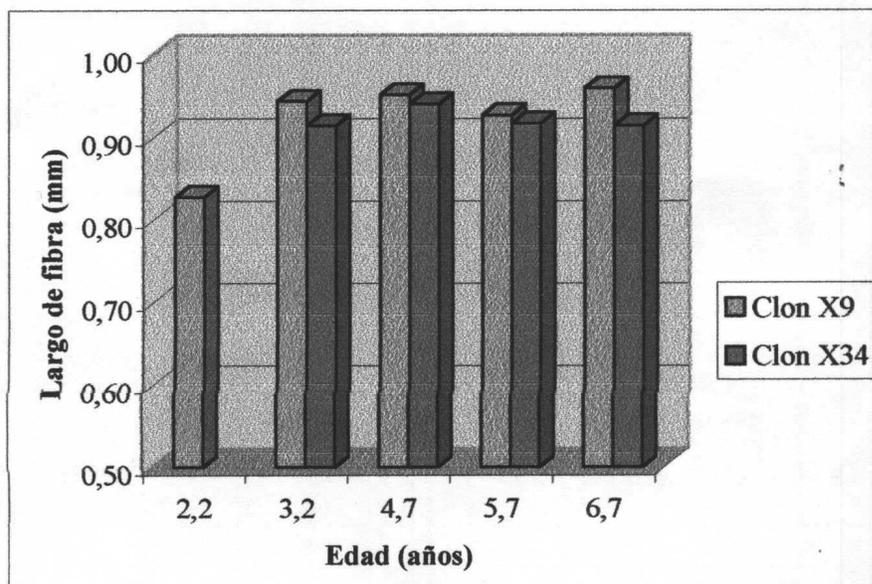
\* Intervalo de 95% de confianza (IC) para la media

**Cuadro N° 14. Largo de fibra (mm) para el clon X34 en función de la edad**

Edad	N	Media	IC *	
			Lim inf	Lim sup
3,2	12	<b>0,914</b>	0,887	0,942
4,7	15	<b>0,940</b>	0,902	0,979
5,7	15	<b>0,917</b>	0,875	0,960
6,7	15	<b>0,914</b>	0,879	0,950

\* Intervalo de 95% de confianza (IC) para la media

**Gráfico N° 7. Evolución del Largo de Fibra en función de la edad**



Los datos presentados corresponden a valores de largo de fibra promedio aritmético de las diferentes alturas de muestreo por clon según la edad.

Los resultados muestran un comportamiento de escasas variaciones del largo de fibra con la edad, entre los 3,2 y los 6,7 años, no presentando diferencias significativas para dicho rango de edades.

Cuando consideramos el clon X9, el largo de fibra de los árboles más jóvenes (2,2 años), muestra valores inferiores a los de edades posteriores, con un claro incremento hacia las edades posteriores.

Comparando ambos clones, el clon de *E. grandis* puro (clon X9) muestra una tendencia a presentar una longitud de fibra promedio levemente superior a los del híbrido (clon X34).

#### **4.2.2 Variación con la altura**

En los cuadros y gráficos que se presentan a continuación se exponen los resultados obtenidos en el estudio del largo de fibra, en función de la altura para ambos clones. También se presentan los estimadores de los parámetros de los modelos de regresión, para aquellas edades en las que la variación del largo de fibra con la altura se ajustó significativamente a alguno de los modelos propuestos.

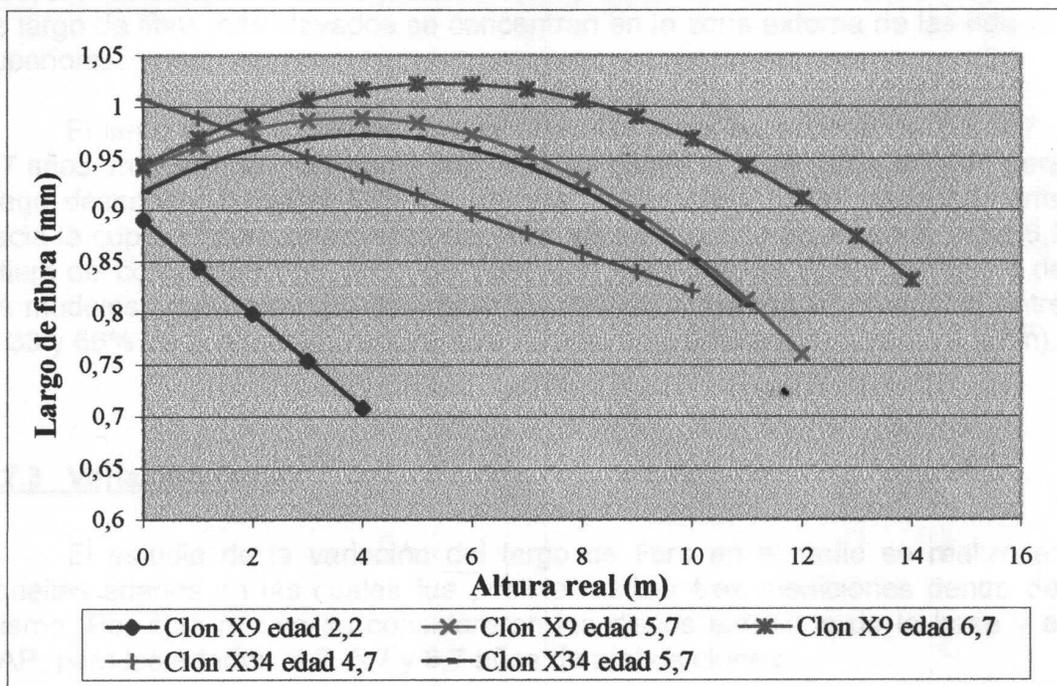
**Cuadro N° 15. Estimadores de los modelos de regresión para Longitud de Fibra en función de la altura por clon según la edad.**

CLON	EDAD	MODELO	ESTIMADORES		
			B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
X 9	2,2	Lineal	0,8905	-0,0456	
		Signif	(< 0.0001)	-0,0719	
	3,2	Ninguno			
		4,7	Ninguno		
	5,7		Cuadrático	0,9397	0,0260
		Signif	(< 0.0001)	(0.2678)	(0.0968)
6,7	Cuadrático	0,9435	0,0289	-0,0026	
	Signif	(<0.0001)	(0.0294)	(0.0090)	
X 34	3,2	Ninguno			
		4,7	Lineal	1,0078	-0,0186
	Signif		(<0.0001)	(0.0028)	
	5,7	Cuadrático	0,91795	0,02727	-0,00339
		Signif	(<0.0001)	(0.1206)	(0.0341)
6,7	Ninguno				

**Cuadro N° 16. Largo de Fibra promedio (mm) para las diferentes alturas de muestreo por clon según la edad.**

Clon	Edad	Altura (mm)					Promedio
		0	0AP	25	50	100	
X9	2,2	0,805	0,866	0,874	0,869	0,725	0,828
	3,2	0,935	0,948	0,976	0,915	0,945	0,944
	4,7	0,910	0,988	0,957	0,968	0,933	0,951
	5,7	0,953	0,966	0,988	0,934	0,794	0,927
	6,7	0,931	0,986	1,035	0,997	0,847	0,959
Promedio clon X9		0,907	0,951	0,966	0,937	0,849	0,922
X34	3,2	0,901	0,960	0,879		0,917	0,914
	4,7	0,964	1,023	0,955	0,885	0,875	0,940
	5,7	0,907	0,988	0,932	0,948	0,811	0,917
	6,7	0,869	0,893	0,958	0,957	0,895	0,914
Promedio clon X34		0,910	0,966	0,931	0,930	0,875	0,922

**Gráfico N° 8. Modelos ajustados para Longitud de Fibra en función de la altura según la edad para los clones X9 y X34.**



En el caso del clon X9, en términos generales el largo de fibra tiende a aumentar desde la base hasta determinado punto para luego descender hacia la copa. Este comportamiento no lo presentan los árboles de 3,2 años de edad.

Cuando consideramos las alturas en metros en las edades de 2,2, 3,2 y 4,7 años, se observa un incremento del largo de fibra desde la base hacia el 1,3 y 2,0 m. de altura, a partir del cual presenta una caída hacia los 3,5, 4,0 m. Posteriormente, se observa un nuevo incremento en las edades de 3,2 y 4,7 años. Estas edades a diferentes niveles reproducen su comportamiento con la altura. El descenso del largo de fibra en las edades 3,2 y 4,7 entre el 33 y 66% y el DAP y el 33%, respectivamente, se corresponden con el descenso del largo de fibra hacia la altura comercial demostrada por la edad de 2,2 años. Las edades 3,2 y 4,7 años no se ajustaron a ninguno de los modelos propuestos.

Para el caso de las edades de 5,7 y 6,7 años el comportamiento del largo de fibra promedio resulta de tipo cuadrático, con valores crecientes desde la base hacia el 33% (entre los 4 y 5 m) para luego decrecer hacia la copa. Estas edades no reproducen el comportamiento mostrado por las edades anteriores.

Esto puede asociarse a los mayores valores de largo de fibra en las zonas externas del disco (fibras más largas producidas en las edades superiores), las cuales contribuyen en una elevada proporción al promedio ponderado de los discos. Analizando los datos promedio por probeta se observa que los valores de largo de fibra más elevados se concentran en la zona externa de las edades superiores.

El largo de fibra promedio en el clon X34 para las edades de 3,2, 4,7 y 5,7 años, muestra un incremento con la altura desde la base hacia el DAP, para luego descender hacia el 33% de manera acelerada y luego paulatinamente hacia la copa. El comportamiento del largo de fibra con la altura en la edad 6,7 difiere del comportamiento propuesto anteriormente y no se ajusta a ninguno de los modelos propuestos. En este caso los valores máximos se presentan entre el 33 y 66% de la altura comercial, con valores muy similares (entre los 4 y 8m).

#### **4.2.3 Variación radial**

El estudio de la variación del largo de fibra en el radio se realizó en aquellas edades en las cuales fue posible realizar tres mediciones dentro del mismo. Por este motivo se consideraron los discos extraídos de la base y el DAP, para las edades 4,7, 5,7 y 6,7 años de ambos clones.

A continuación se presentan los valores promedio por posición radial según la edad y altura de muestreo, para ambos clones.

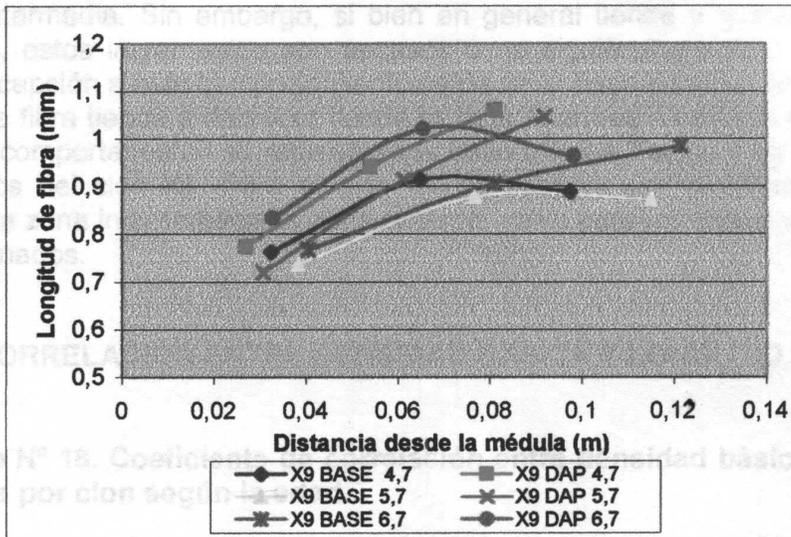
**Cuadro N° 17. Longitud de fibra promedio (mm) para las tres zonas de muestreo en la base y al DAP por clon según la edad.**

Clon	Altura	Edad	Fibra *		
			Base	Intermedia	Cumbre
X9	Base	4,7	0,763 a	0,914 a	0,889 a
		5,7	0,737 a	0,878 a,b	0,973 b
		6,7	0,767 a	0,905 b	0,985 c
	DAP	4,7	0,774 a	0,942 b	1,059 c
		5,7	0,720 a	0,914 a,b	1,047 b
		6,7	0,835 a	1,021 b	0,964 a,b
X34	Base	4,7	0,751 a	0,968 b	1,005 b
		5,7	0,758 a	0,959 b	0,830 b
		6,7	0,796 a	0,863 a	0,880 a
	DAP	4,7	0,758 a	1,017 b	1,094 b
		5,7	0,808 a	0,960 a,b	0,997 b
		6,7	0,780 a	0,914 a	0,903 a

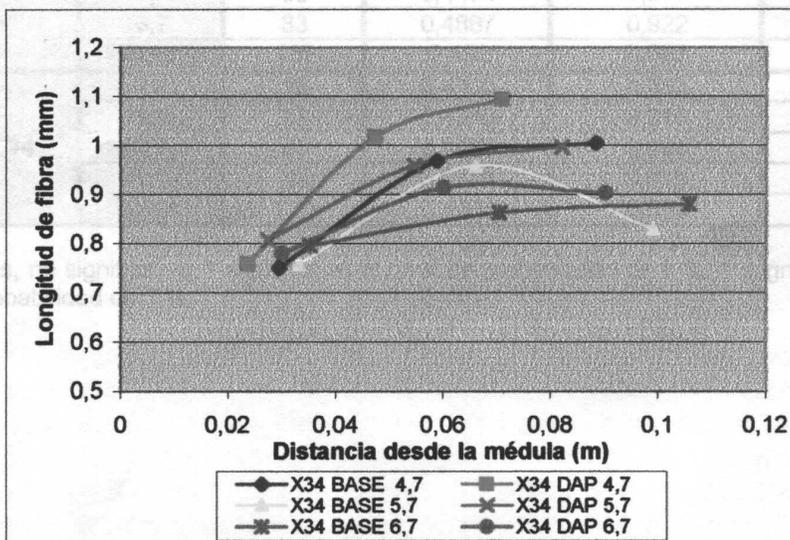
\* Valores con letras iguales no difieren significativamente ( $P \leq 0,10$ ) en la comparación de zonas (horizontalmente).

Utilizando los datos promedio presentados en el cuadro N°17, se confeccionaron los siguientes gráficos para facilitar la comprensión de los resultados obtenidos.

**Gráfico N° 9. Variación radial de la longitud de fibra según la edad para el clon X9.**



**Gráfico N° 10. Variación radial de la longitud de fibra según la edad para el clon X34.**



Se observa una tendencia general de aumento de la longitud de fibra promedio desde la médula (zona interna) hacia la corteza (zona externa). En ambos clones existe un incremento pronunciado desde la zona interna hacia la zona intermedia. Sin embargo, si bien en general tiende a aumentar hacia la corteza, estos incrementos son escasos o no significativos para el clon X34. Una excepción a este comportamiento se da en la base a los 5,7 años, donde el largo de fibra tiende a decrecer desde la zona intermedia hacia la corteza. Este mismo comportamiento se registró en la base a los 4,7 años y en el DAP a los 6,7 años del clon X9. Para el clon X9 se observa un incremento sostenido desde la zona interna hacia la zona externa, salvo para los casos anteriormente mencionados.

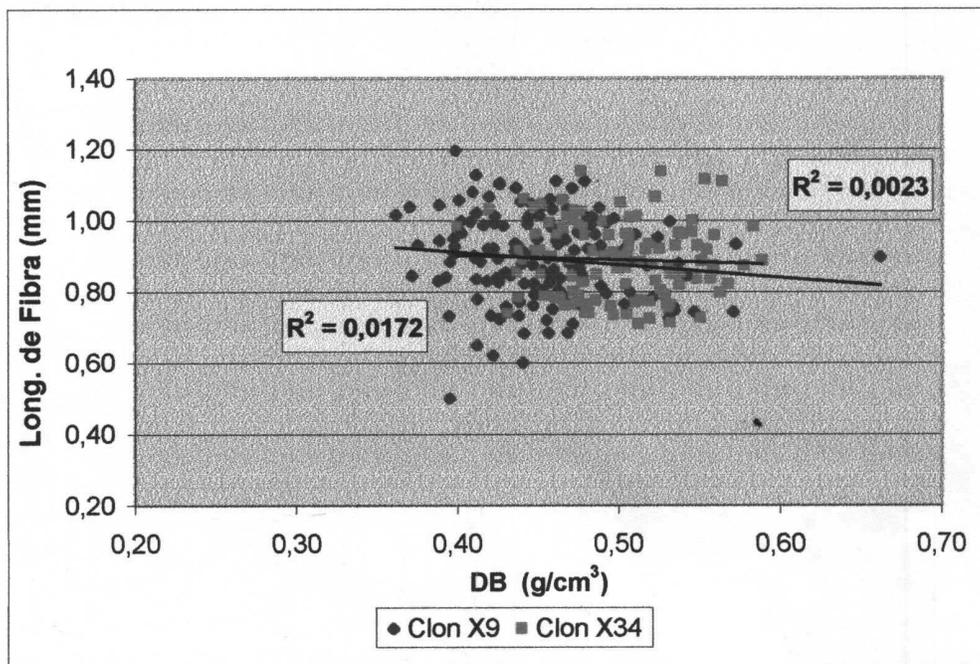
#### 4.3 CORRELACION ENTRE DENSIDAD BASICA Y LONGITUD DE FIBRA

**Cuadro N° 18. Coeficiente de correlación entre densidad básica y longitud de fibra por clon según la edad.**

Clon	Edad	N	DEAD Promedio	Long. de fibra Promedio	Correlación	
X 9	2,2	18	0,4335	0,806	0,0323	ns
	3,2	21	0,4321	0,934	0,0349	ns
	4,7	32	0,4424	0,901	-0,4345	*
	5,7	33	0,4474	0,877	-0,1756	ns
	6,7	33	0,4887	0,922	-0,3558	*
	Total	137	0,452	0,893	-0,1312	ns
X 34	3,2	18	0,4800	0,883	-0,3088	ns
	4,7	27	0,4840	0,910	-0,1565	ns
	5,7	35	0,4883	0,888	-0,1080	ns
	6,7	30	0,5356	0,878	0,5144	**
	Total	110	0,4988	0,890	-0,0482	ns

+ ns, no significativo; \* significativo al nivel de probabilidad de 5 %; \*\* significativo al nivel de probabilidad de 1 %.

**Gráfico N° 11. Correlación entre longitud de fibra y densidad básica para los clones X9 y X34.**



En el gráfico N° 11, si bien no existen correlaciones significativas, se observa una leve tendencia decreciente entre las propiedades para el rango de edades estudiadas.

En el caso del clon X9 las edades 4,7 y 6,7 muestran un coeficiente de correlación significativo, siendo la correlación entre ambas propiedades de tipo negativo. En el clon X34 únicamente la edad 6,7 presenta una correlación significativa pero positiva entre estas propiedades. Esto último determinaría una diferencia importante en cuanto a las propiedades de la madera para los clones estudiados.

Adicionalmente se estudió la relación entre la densidad básica y la longitud de fibra para las diferentes posiciones del árbol. En relación a la altura, no se obtuvieron correlaciones significativas entre la densidad básica y la longitud de fibra para ninguna de las posiciones. En cambio en el diámetro, para el clon X9, se obtuvo una correlación negativa significativa entre las propiedades estudiadas solamente en la zona externa del árbol. En el clon X34, sólo la correlación en la zona media resulta significativa. Se observa una tendencia a aumentar los niveles de correlación entre la densidad básica y la

longitud de fibra hacia las zonas externas del árbol. Esto último podría indicar un aumento en la correlación entre ambas propiedades a medida que los clones avanzan en edad.

## 5 DISCUSION

### 5.1 DENSIDAD BASICA

#### 5.1.1 Fuentes de Variación

De los resultados obtenidos surgen diferencias significativas entre ambos clones. El clon X34 posee mayores densidades que el clon X9 para todas las edades estudiadas. Estas diferencias podrían deberse a que el clon X34 es un híbrido entre *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus camaldulensis*, esta última, especie con densidad superior a la de *Eucalyptus grandis*. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Hans (1974), quien señala que los híbridos adquieren densidades intermedias a la de las especies parentales.

Para el rango de edades en estudio se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) en ambos clones. Se observó que la densidad básica tiende a aumentar con la edad, resultados coincidentes con lo reportado por Ribeiro y Zani (1993), Trugilho et al. (1996) y Raymond (2000). Para las edades en estudio se obtuvieron valores de densidad básica promedio entre 0,429 y 0,487 para el clon X9, y entre 0,470 y 0,541 para el clon X34. Estas variaciones significan aumentos de 13,5 y 15,1% entre las edades extremas para ambos clones, respectivamente.

Las diferencias entre edades, como muestran los intervalos de confianza, se tornan significativas en las edades superiores. Estos resultados difieren de los obtenidos por Trugilho et al. (1996), quienes observaron una tendencia a la estabilización de la densidad básica entre los 3 y 4 años de edad.

En relación a la variación en la altura, los resultados obtenidos indican que la densidad básica tiende a disminuir desde la base hasta los 2 - 4 metros para luego aumentar hacia la copa. Este comportamiento general se observa para todas las edades, y es el reportado con mayor frecuencia en la bibliografía consultada, entre los que se encuentra Taylor (1973 a,b), Malan (1982), Stöhr y Mackay (1983). Considerando las alturas fijas de muestreo, los valores mínimos de densidad se encuentran entre el DAP y el 33% de la altura comercial.

Para las edades estudiadas se ajustaron diferentes modelos, siendo el modelo de tipo cúbico el que mejor se ajustó para la mayoría de las edades. Para todas las edades del clon X9 exceptuando los 2,2 años, y dos edades del clon X34 se ajustaron modelos cúbicos con niveles de confianza superiores al

98%. Para las edades 2,2 del clon X9 y 6,7 del X34, se ajustaron modelos lineales y cuadráticos, respectivamente. Solamente la edad 3,2 del clon X34 no se ajustó a ninguno de los modelos propuestos.

Considerando los árboles individuales, se observan variaciones importantes entre los mismos, incluso dentro de la misma edad. Estas variaciones entre árboles fueron reportadas por Centurión y Llano (1995) en árboles de 12 años de edad. Menos del 50% de los árboles estudiados por los autores se ajustaron a modelos cúbicos o cuadráticos.

En relación al comportamiento radial de la densidad básica, no se encontraron diferencias significativas entre las posiciones radiales en el clon X9. Por otro lado el clon X34 si muestra diferencias significativas entre posiciones. Los resultados obtenidos para el clon X9 coinciden con los obtenidos en estudios recientes realizados por De Mello et al. (2002) en árboles de entre 8 y 10 años de edad. Estos autores no encontraron diferencias en la densidad básica medida en tres posiciones entre la médula y la corteza. Estos resultados demuestran que la madera analizada es madera juvenil, lo cual estaría explicando la escasa variación radial de la densidad básica.

A modo de tendencia general, se observa un descenso de la densidad desde la zona interna hacia la zona central, con un aumento posterior hacia la externa. Estos resultados coinciden con lo reportado por Taylor (1973 a, b) en árboles de 14 años y Malan (1982) en árboles de 20 años. Estos autores señalan que los valores mínimos de densidad se dan a los 4 y 5 cm, respectivamente. Wilkins y Horne (1991) observaron esta misma tendencia en árboles de 9 años y medio. Sin embargo, el comportamiento reportado con mayor frecuencia en la bibliografía es el incremento de la densidad básica desde la médula hacia la corteza.

Para el clon X34, la edad 4,7 muestra un comportamiento semejante al del clon X9. Las restantes edades muestran el comportamiento típicamente reportado en la bibliografía de aumentos de la densidad desde la médula hacia la corteza. Los autores que obtuvieron dichos resultados trabajando con árboles de edades semejantes a las estudiadas fueron Hans et al. (1972) en árboles de 7 años y Hans (1974) con árboles de 5 años. Las diferencias obtenidas entre ambos clones estudiados indicarían una transición más temprana de madera juvenil a madera adulta en el clon híbrido (X34) con respecto al clon de *Eucalyptus grandis* puro (X9).

### **5.1.2 Pilodyn**

Los resultados obtenidos indican una elevada correlación negativa entre la densidad básica promedio del árbol y la penetración del Pilodyn al DAP, adquiriendo valores de -0,678 y -0,615, para el clon X9 y X34, respectivamente, cuando se consideran todos los registros por clon. Resultados semejantes fueron reportados por Do Vale et al. (1995) quienes obtuvieron coeficientes de correlación de -0,55 % trabajando con árboles de 8 años de edad. Los valores de correlación obtenidos indican, según Raymond (1995) una fuerte correlación negativa entre ambos parámetros, encontrándose dentro del rango de valores reportados por la bibliografía.

Los datos desglosados por edad no son significativos debido al escaso número de muestras por edad. Por otro lado, los valores mas elevados de correlación se obtuvieron para las edades de 2,2 y 3,2 años. Esto podría deberse a que la madera evaluada por el Pilodyn representa una gran proporción de la madera del árbol para estas edades.

La determinación de la penetración del Pilodyn en todas las alturas de muestreo ensayadas permitió comparar los valores promedio de densidad básica con los valores de penetración de Pilodyn. Los niveles de correlación entre los valores promedio de penetración de Pilodyn y la densidad básica resultaron altamente significativos y negativos, salvo para las edades 4,7 y 6,7 del clon X34. No se encontraron en la bibliografía consultada estimaciones de penetración de Pilodyn en alturas diferentes del DAP.

Del análisis de las correlaciones entre la penetración del Pilodyn y la densidad básica según zonas radiales, surgen importantes diferencias entre ambos clones. Para el clon X9 todas las zonas presentaron correlaciones negativas altamente significativas, mientras que para el clon X34 solamente las densidades de las zonas intermedia y externa resultaron significativas. Estos resultados indicarían que la capacidad predictiva de la densidad utilizando el Pilodyn tiende a disminuir cuando la densidad presenta variaciones importantes en dirección radial.

Cabe destacar que para ambos clones, las correlaciones más altas se dan entre la penetración del Pilodyn y la densidad básica de la zona intermedia, y no la externa como sería dable esperar.

Estudios recientemente realizados en el país por De Mello et al. (2002) en árboles de entre 8 y 10 años de edad, señalan coeficientes de correlación

de -0,837% entre la penetración del Pilodyn al DAP y la densidad de la zona externa del árbol.

Considerando los resultados obtenidos, se puede afirmar que el Pilodyn es un método de muestreo no destructivo que puede ser utilizado para la predicción de la densidad básica con ciertas precauciones. Las estimaciones utilizando el Pilodyn tendrán mayor poder predictivo cuando, la evaluación se realiza en un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad básica promedio del árbol. Estos puntos están determinados por la edad de los árboles, responsable a la vez del patrón interno de distribución de la densidad radial. Dentro del rango de edades estudiados el Pilodyn tendría mayor poder predictivo para las edades inferiores de ambos clones. La edad superior del clon X9 mostró correlaciones elevadas, semejantes a las citadas en la bibliografía para edades superiores (Raymond, 1995; De Mello et al, 2002). Estas diferencias pueden ser atribuidas a que en las edades superiores, la densidad tiende a estabilizarse hacia la zona externa, la cual adquiere mayor importancia relativa en cuanto a su proporción en el total de la madera del árbol, siendo además la madera evaluada con el Pilodyn.

### **5.1.3 Punto óptimo de muestreo**

En relación al punto óptimo de muestreo, se observó un efecto importante de la edad y el material genético (clones). El DAP resultó un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad promedio para el intervalo de edad entre los 3,2 y 5,7 años del clon X9 y para la edad de 3,2 años del clon X34. Para las edades extremas de ambos clones la base constituye un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad básica promedio del árbol.

Para ambos clones, el punto de muestreo mejor correlacionado con la densidad promedio del árbol para la edad de 6,7 años resultó ser la base. Estos resultados contrastan con lo encontrado en la bibliografía para edades similares.

Los resultados obtenidos para el clon X9 son semejantes a lo reportado comúnmente en la bibliografía. Varios autores como Ferreira (1968; 1970), citado por Brasil y Ferreira (1971), Brasil et al. (1979), y Brasil et al. y Barrichelo et al. (1980), citados por Barrichelo et al. (1983), señalan que la densidad promedio del árbol puede ser estimada a partir de discos extraídos al DAP.

Bhat et al. (1990) obtuvieron resultados muy semejantes a los obtenidos en este estudio para el clon X9. Estos autores señalan que la densidad promedio del árbol puede ser estimada con razonable precisión usando los valores de densidad al DAP, excepto a edades tempranas como los 3 años, donde la densidad de la base es un mejor estimador de la densidad promedio.

La escasa representatividad del DAP para la estimación de la densidad promedio en el clon híbrido (clon X34) posee antecedentes bibliográficos en trabajos realizados por Bouvet y Bailleres (1995), quienes indican que la densidad promedio puede ser estimada a partir de discos extraídos entre el 25 y 50 % de la altura comercial.

Downes et al. (1997) señalan que el coeficiente de correlación entre el punto óptimo de muestreo y la densidad promedio debería ser un valor no menor a 70%. En este trabajo se obtuvieron varios puntos de muestreo altamente correlacionados con los valores promedio por árbol, por lo cual sería apresurado indicar un punto óptimo de muestreo.

## **5.2 LONGITUD DE FIBRA**

### **5.2.1 Fuentes de Variación**

En cuanto a la variación de la longitud de fibra en función de la edad, podemos afirmar que la longitud de las fibras se estabiliza a partir de 3,2 años de edad, para el rango de edades estudiado. No se detectaron diferencias significativas entre los valores promedio obtenidos para las diferentes edades comprendidas entre los 3,2 y los 6,7 años para ambos clones. Solamente el clon X9 presenta un incremento significativo entre los 2,2 y los 3,2 años. Estos resultados son coincidentes en términos generales con los reportados en la bibliografía por Trugilho et al. (1996), quienes señalaran incrementos hasta los 4 años, con una tendencia a la estabilización posterior. Sin embargo otros autores señalan aumentos decrecientes con la edad hasta los 9 años de edad (Bhat et al. 1990). La estabilización de la longitud de fibra a partir de los 3,2 años permitiría incorporar materiales más jóvenes a un programa de mejoramiento, no siendo necesario esperar hasta los 5 años para iniciar las evaluaciones, como fue reportado por Raymond (2000).

En cuanto a la variación de la longitud de fibra en función de la altura, se observa en todos los casos un incremento de los valores promedio de longitud

de fibra hasta cierto punto y posteriormente un decrecimiento hacia la zona de la copa. Los mayores valores de longitud de fibra se registraron para el DAP y el 33 % de la altura comercial de ambos clones (Cuadro N° 16). Los modelos que mejor se ajustaron al comportamiento de la longitud de fibra son de tipo cuadrático o lineal, si bien no todas las edades se ajustaron a algún modelo. Los modelos lineales se ajustaron para las edades inferiores que mostraron algún ajuste, donde la zona basal es estudiada con mayor intensidad, en relación al resto del árbol. Estos resultados coinciden con los reportados por Bhat et al. (1990), quienes observaron un incremento de la longitud de fibra hasta un 25 % de la altura total, seguido de un decrecimiento hacia la copa del árbol.

El patrón de distribución de la longitud de fibra en el radio coincide con lo reportado por Taylor (1984), Brasil et al. (1979) y Brasil y Ferreira (1979) citados por Barrichelo (1988), Tomazello Filho (1985), Bhat et al. (1990) y Varghese et al. (1995). Estos autores reportan un incremento de la longitud de fibra desde la médula hacia la corteza. Los máximos valores promedio registrados se obtuvieron en la zona intermedia y más frecuentemente en la externa o más próxima a la corteza.

Se observó, en términos generales, que los mayores incrementos se dan entre la zona interna (médula) y la intermedia (de 0,77 a 0,93 y de 0,77 a 0,95 mm., para los clones X9 y X34 respectivamente), seguido de un incremento mas moderado hacia la zona externa (de 0,93 a 0,99 y de 0,947 a 0,95 mm., para los clones X9 y X34 respectivamente). Resultados similares fueron reportados por Hans et al. (1972) y reafirmados en estudios recientes realizados por Böthig (2001), quien señala incrementos acelerados en el largo de fibra desde la médula hacia las zonas externas, con una tendencia a la estabilización cercana a los 10 cm de radio. Este comportamiento evidencia nuevamente que la madera estudiada constituye madera juvenil, en la cual las propiedades varían significativamente en dirección radial.

### **5.3 CORRELACION ENTRE DENSIDAD BASICA Y LONGITUD DE FIBRA**

Cuando se comparan los valores de densidad básica y longitud de fibra obtenidos en cada probeta de ensayo, las correlaciones obtenidas no son significativas en ninguno de los clones estudiados. Los coeficientes de correlación obtenidos son de -0,131 y -0,482 para el clon X9 y X34 respectivamente. Estos coeficientes indican que las propiedades en estudio no estarían asociadas, observaciones coincidentes con lo reportado por Hans et al. (1972), Vasconcellos y Da Silva (1985) y Xavier et al. (1997).

Al analizar la información desglosada por edades surge que para el clon X9 existe una correlación negativa y significativa entre las propiedades en estudio para las edades de 4,7 ( $r = -0,435$ ) y 6,7 ( $r = -0,356\%$ ) años. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Malan y Verryn (1996) quienes reportaran correlaciones negativas y significativas entre ambas propiedades trabajando con *Eucalyptus grandis* de 5 años de edad. Por otro lado, Bhat et al. (1990) obtuvo correlaciones negativas entre ambas propiedades en árboles de 9 años, mientras que para las edades inferiores las mismas no resultaron significativas.

En relación al clon X34 solo para la edad de 6,7 años se obtuvo una correlación significativa, aunque en este caso positiva. Las correlaciones entre las demás edades no resultaron significativas. Si bien algunos autores señalan correlaciones positivas entre la densidad básica y la longitud de fibra (Demuner et al, 1991; Trugilho et al, 1996), son trabajos realizados con árboles de *Eucalyptus grandis* puros, por lo cual no necesariamente son comparables con los resultados obtenidos para el clon híbrido.

## 6 CONCLUSIONES

Para el rango de edades estudiado (2,2 a 6,7 años) se constató un incremento de la densidad básica con la edad. Estos incrementos fueron de 13,5 y 15,1 % para los clones X9 y X34, respectivamente. El clon híbrido presentó valores de densidad básica promedio superiores que el clon puro en todas las edades evaluadas.

La variación de la densidad básica en altura se ajustó en la mayoría de los casos a modelos de tipo cúbico, presentando un decrecimiento inicial desde la base hasta los 2 - 4 metros con un aumento posterior hacia la copa.

En relación a la variación radial, para el clon X9 no se obtuvieron diferencias significativas entre posiciones radiales. En cambio, el clon X34 si mostró diferencias significativas entre zonas. A modo de tendencia, el comportamiento comúnmente observado es un descenso de la densidad básica desde la médula hacia la zona media y un incremento posterior hacia la corteza.

Los resultados obtenidos en cuanto al uso del Pilodyn, como un instrumento de determinación no destructivo de la densidad básica, mostraron una correlación alta y negativa entre la densidad básica promedio del árbol y la penetración del Pilodyn al DAP. Los valores de correlación obtenidos fueron -0,678 y -0,615 para los clones X9 y X34 respectivamente. Dentro del rango de edades estudiado el Pilodyn tendría mayor poder predictivo para la edad de 6,7 años del clon X9 y para las edades inferiores de ambos clones.

El punto óptimo de muestreo depende de la edad y el material genético. El DAP resultó un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad promedio para el intervalo de edad entre 3,2 y 5,7 años del clon X9, pero con escasa representatividad en el clon híbrido. Para las edades extremas de ambos clones, la base constituye un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad básica promedio del árbol.

En cuanto a la variación de la longitud de fibra en función de la edad, se observó una tendencia a la estabilización a partir de los 3,2 años. Esta estabilización de la longitud de fibra permitiría seleccionar materiales a edades tempranas.

La longitud de fibra mostró un comportamiento de tipo cuadrático con la altura. Se observa un aumento desde la base, alcanzando los valores máximos entre la altura al DAP y el 33% de la altura comercial.

La variación de la longitud de fibra en dirección radial muestra una tendencia a aumentar desde la médula hacia la corteza. En términos generales los mayores incrementos se dan desde la médula hacia la zona intermedia, seguido de un incremento más moderado hacia la zona externa.

En base a los resultados obtenidos del estudio de la correlación entre la densidad básica y la longitud de fibra, se puede afirmar que dichas propiedades no están asociadas. Los valores de correlación obtenidos son  $-0,131$  y  $-0,048$  para el clon X9 y X34, respectivamente. Este elemento estaría indicando la posibilidad de realizar selección independiente de ambas características.

## 7 RESUMEN

Se estudio el comportamiento de la densidad básica y la longitud de fibra entre clones, edades y posiciones dentro del árbol. Se extrajeron discos de 5 cm. de espesor de la base, DAP, 33%, 66% y el 100% de la altura comercial de 2 clones. Los materiales son clon puro de *Eucalyptus grandis* y uno híbrido de *Eucalyptus grandis X Eucalyptus camaldulensis*, ambos clones de 2,2 a 6,7 años de edad. Adicionalmente se determinó la correlación entre ambas propiedades y entre los dos tipos de muestreo utilizados (destrutivo y no destructivo). Para ambos, se realizó una aproximación al punto óptimo de muestreo. La densidad básica del clon híbrido fue superior para todas las edades estudiadas. Esta tiende a aumentar con la edad en ambos clones. Dentro del árbol tiende a disminuir desde la base hacia los 2-4 metros de altura para luego aumentar hacia la copa. El largo de fibra aumenta desde la base hacia el DAP-33% para luego decrecer hacia la copa. El clon híbrido presenta un aumento de la densidad básica desde la médula hacia la corteza. El largo de fibra tiende a aumentar desde la médula hacia la corteza. Correlación no significativa entre ambas propiedades. Alta correlación entre la densidad básica promedio del árbol y la penetración del Pilodyn al DAP. El punto óptimo de muestreo depende de la edad y del material genético. Para el clon puro el DAP resultó un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad básica promedio para el intervalo de edades de 3,2 a 5,7 años. La base resultó ser un punto de muestreo fuertemente correlacionado para las edades extremas de ambos clones.

**Palabras clave:** *Eucalyptus grandis*, clones, propiedades de la madera, densidad básica, longitud de fibra, muestreo, Pilodyn.

## 8 SUMMARY

Variation of basic density and fiber length was studied among clones of different ages and genetic background. Five-centimeter discs were extracted from the base, DBH, and 33%, 66%, and 100% of commercial height. The genetic material consisted of a pure clone of *Eucalyptus grandis* and a hybrid clone from a *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* cross. Both clones ranged 2.2 to 6.7 years old. Two sampling methods were used, destructive and non-destructive, and correlations among both and optimal sampling points were estimated. The basic density of the hybrid clone was higher than that of the pure clone for all ages considered. Basic density seemed to increase with age for both clones. Basic density decreased from the base up to 2-4 m., and increased from there to the tree top. Fiber length increased from the tree base to DBH-33%, and decreased thereafter. In the hybrid clone basic density increased from pith to bark. Generally fiber length increased from pith to bark. Correlations between both variables were not significant. A high correlation was found between the average basic density of the tree and Pilodyn penetration at DBH. The optimal sampling point varied with age and genetic material. DBH sampling point was found to be highly correlated with the average basic density for the age range 3.2 to 5.7 years old. Base sampling point was highly correlated with basic density for the youngest and oldest ages.

**Keywords:** *Eucalyptus grandis*, clones, wood properties, wood density, fiber length, sampling, Pilodyn.

## 9 BIBLIOGRAFIA

1. BAMBER R.K.; HORNE R.; GRAHAM-HIGGS A. 1982. Effect of fast growth on the properties of *Eucalyptus grandis*. Australian Forest Research 12 (2): 163-167.
2. BARRICHELO L.E.G.; BRITO J.O.; BAZANELLI A.V. 1983a. Basic density and characteristics of *Eucalyptus grandis* wood fibres. In: ABCP 16<sup>th</sup> annual meeting 3<sup>rd</sup> Latin American cellulose and paper congress. 21-26 de Noviembre, Sao Paulo, Brasil. pp 113-125. Tomado de: CAB Abstract. 1984-1986.
3. \_\_\_\_\_; BRITO J.O.; MIGLIORINI A.J. 1983b. Estudo da variaçao longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. Revista Silvicultura. 8 (28): 726-731.
4. \_\_\_\_\_; DA SILVA Jr. F.G.; CAMPINHOS E.N.; AUGUSTO F.; BRUN F.L. 2001. Growth rate and wood quality from *Eucalyptus* clones for pulp production. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 10-14 Setiembre, Valdivia, Chile. 14p.
5. BERTOLUCCI F.L.G.; DEMUNER B.J.; LA TORRACA S.M. 1992. Estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características da madeira e polpa de eucalipto. In (13<sup>a</sup>, Encontro Nacional da Tecnicelpa, Figueira da Fóz, Brasil). 17 p.
6. \_\_\_\_\_; PENCHEL R.N. 1993. Clonagem do eucalipto: efeitos sobre a produtividade e qualidade da madeira. Ciencia Hoje. 16 (91): 16-21.
7. BHAT K.M. 1990. Wood quality improvement of Eucalypts in India: an assessment of property-variations. Journal of the Indian Academy of Wood Science. 21 (2): 33-40.
8. \_\_\_\_\_; BHAT K.V.; DHAMODARAN T.K. 1990. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* groen in Kerala, India. Wood and fiber Science. 22 (1): 54-61.
9. BOSSI J. 1969. Carta geológica. Montevideo. Universidad de la República, Departamento de publicaciones. 40 p.

10. BOTHIG S. 2001. Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Informe de investigación no. 5. Montevideo, Uruguay. 23 p.
11. BOUVET J.M.; BAILLERES H. 1995. Expression of some growth and wood property traits among *Eucalyptus urophylla* x *grandis* clones in Congo. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 February, Hobart, Australia. pp. 89-92.
12. BRASIL M.A.M.; FERREIRA M. 1971. Variação da densidade básica da madeira de *E. alba* Reinew, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill ex Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales (IPEF). (2/3): 129-148.
13. \_\_\_\_\_; FERREIRA M. 1972. Variation in basic density and characteristics of the fibres in *Eucalyptus grandis* at b.h. Preliminary analysis. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales (IPEF). (5): 81-90. Tomado de: CAB Abstract. 1972-1975.
14. BUZZO R.M.; MARTINEZ HAEDO J.F.; SCARONE P. 1997. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Populus deltoides* cv "Harvard" (Ex I-63/51). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 78 p.
15. CAMPINHOS E.; CLAUDIO DA SILVA E. 1990. Development of the *Eucalyptus* tree of the future. In: Proceedings of Espra Spring Conference. Seville, Spain. 22 p.
16. CHAPOLA G.B.J.; NGULUBE M.R. 1990. Basic density of some hardwood species grown in Malawi. South African Forestry Journal. (153): 12-17.
17. CENTURION C.; LLANO L. 1995. Determinación de peso específico aparente básico por los métodos Unit 237-70 y máximo tenor de humedad con probetas de incremento radial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 78 p.
18. CLARKE C.R.E.; SHAW M.J.P.; WESSELS A.M; JONES W.R. 1999. Effect of differences in climate on growth, wood, and pulp properties of nine eucalypt species at two sites. Tappi Journal. 82 (7): 89-99.
19. CORONEL E.O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas; Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades, y sus aplicaciones. Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. 187 p.

20. COWN D.J. 1978. Comparison of the Pilodyn and Torsiometer methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 8 (3): 383-391.
21. DA SILVA ROSADO S.C.; BRUNE A. 1983. Avaliação da densidade básica da madeira em árvores vivas. *Revista Silvicultura*. 8 (28): 859-862.
22. DE MELLO J. C.; LIZUKA K.; BENNADJI Z.; BALMELLI G.; UETSUKI Y. 2002. Evaluación de características de la madera en *Eucalyptus grandis*. Boletín de Divulgación no.3 INIA-JICA. Tacuarembó, Uruguay. 13 p.
23. DEMUNER B.J.; VIANNA DORIA E.L.; CLAUDIO-DA-SILVA JR E.; MANFREDI V. 1991. As Propiedades do Papel e as Características das Fibras de Eucalipto. In (24ª., Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, 25-29 de Noviembre, San Pablo, Brasil.) pp. 621-641.
24. \_\_\_\_\_; BERTOLUCCI F. de L.G. 1993. Seleção Florestal: Uma nova abordagem a partir de estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características da madeira e polpa de eucalipto. In (26ª., Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, 22-26 de Noviembre, San Pablo, Brasil.) 16 p.
25. DE SOUZA V.R.; CARPIM M.A.; BARRICHELO L.E.G. 1986. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestais (IPEF). (33): 65-72.
26. DO VALE A.T.; MOURA V.P.G.; MARTINS I.S.; REZENDE D.C.A. 1995. Relationship between the basic medium density, the penetration of a 'Pilodyn' and the diameter classes and axial variation of the basic density in *Eucalyptus grandis*. *Revista Arvore* 19 (1): 80-91. Tomado de: CAB Abstract. 1996.
27. DOWNES G.M.; HUDSON I.L.; RAYMOND C.A.; DEAN G.H.; MICHELL A.J.; SCHIMLECK L.R.; EVANS R.; MUNERI E.A. 1997. Sampling plantations. *Eucalypts* for wood and fibre properties. Australia, CSIRO Publishing. 132 p.
28. DU PLOOY A.B.J. 1980. The relationship between wood and pulp properties of *E. grandis* (Hill ex maiden) grown in South Africa. *Appita Journal*. 33 (4): 257-264.

29. FERRARI G. 1995. Variation in *Eucalyptus* sp. wood properties with tree height. *Economia Montana Linea Ecologica* 27 (5): 53-58. Tomado de: CAB Abstract. 1996-1998.
30. FONSECA S.M.; OLIVEIRA R.C.; SILVEIRA P.M. 1996. Seleção da árvore industrial (procedimientos, riscos, custos e benefícios). *Revista Arvore*. 20 (1): 69-85.
31. GAIOTTO M.R. 1988. Influencia da idade e do espaçamento sobre a qualidade da madeira para produção de celulose. Piracicaba. Universidade de Sao Paulo. Escuela superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 17 p.
32. GELID P.; RODRIGUEZ TRAVERSO J.; PATHAUER P. 2001. Empleo de Pilodyn 6J-Forest, en programas de mejoramiento forestal, para *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*, *E. globulus* ssp. *maidenii* y *E. dunnii*. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 10-14 Setiembre, Valdivia, Chile. 12 p.
33. GOMES DA SILVA JR F.; BRAGA E.P.1997. Potencialidade da seleção precoce de *Eucalyptus urophylla* em função da qualidade da madeira destinada à produção de celulose. In (30ª., Congreso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, 3-7 de Noviembre, San Pablo, Brasil.) pp. 281-292.
34. HANS A.S.; BURLEY J. 1972. Wood quality of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden in a fertilizer trial al Siamambo, Zambia. *East African Agriculture and Forestry Journal*. 38 (2): 157-161.
35. \_\_\_\_\_; BURLEY J.; WILLIAMSON P. 1972. Wood quality in *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden grown in Zambia. *Holzforschung*. 24 (4): 138-141.
36. \_\_\_\_\_. 1974. Artificial *Eucalyptus grandis* x *tereticornis* híbridos: survival, growth and wood density studies. *East African Agriculture and Forestry Journal*. 39 (3): 321-324.
37. \_\_\_\_\_. 1976. Variation in wood density of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden and *E.tereticornis* Sm. *Zambia Journal os Science and Technology*. 1 (4): 109-112. Tomado de: CAB Abstract. 1979-1981
38. INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. 1970. Determinación del peso específico aparente en maderas. UNIT 237. Montevideo, Uruguay. 6 p.

39. KAGEYAMA P.Y.; LOPES MORA A.; BARRICHELO L.E.G.; MIGLIORINI A.J.; SANSIGOLO C.A. 1983. Variação genética para densidade da madeira em progênies de *Eucalyptus grandis*. Revista Silvicultura. 8 (28): 318-323.
40. LIMA J.T.; BREESE M.C.; CAHALAN C.M. 2000. Variation in wood density and mechanical properties in *Eucalyptus* clones. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 March, Launceston, Australia. pp. 282-291.
41. LOPEZ G.; APIOLAZA L.; POTTS B.; DUTKOWSKI G.; GELID P.; RODRIGUEZ TRAVERSO J. 2001. Genetic parameters for growth and pilodyn from *Eucalyptus globulus* in Argentina. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 10-14 Setiembre, Valdivia, Chile. 7p.
42. MALAN F.S. 1982. Shrinkage and density of mature *E. grandis* (Hill ex Maiden) grown in the Letaba district of Northern Transvaal. CSIR Special Report HOUT 251. 16 p.
43. \_\_\_\_\_. 1988a. Wood density variation in four trees of south african grown *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden). South African Forestry Journal. (144): 36-42.
44. \_\_\_\_\_. 1988b. Genetic variation in some growth and wood properties among 18 full-sib families of South African Grown *Eucalyptus grandis*: A preliminary investigation. South African Forestry Journal. (146): 38-43.
45. \_\_\_\_\_. 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 Forestry Journal. (157): 16-23.
46. \_\_\_\_\_.; HOON M. 1992. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal. (163): 13-20.
47. \_\_\_\_\_.; VERRY N.S.D. 1996. Effect of genotype-by-environment interaction on the wood properties and qualities of four-year-old *Eucalyptus grandis* and *E. grandis* híbridos. South African Forestry Journal. (176): 47-53.
48. MENEZES I.; PEREIRA A.M.; YODOVAL P. 1998. Mix de madeiras: A busca do melhor desempenho global. In (31ª., Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, 19-23 de Outubro, San Pablo, Brasil.) pp. 403-415.

49. RAYMOND C.A. 1995. Genetic control of wood and fibre traits in Eucalypts. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 February, Hobart, Australia. pp. 49-51.
50. \_\_\_\_\_. 2000. Tree breeding issues for solid wood production. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 March, Launceston, Australia. pp. 265-270.
51. REZENDE M.A.; SAGLIETTI J.R.C.; CHAVES R. 1998. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. *Scientia Forestalis*. (53): 71-78.
52. RIBEIRO F. De A.; ZANI FILHO J. 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestais (IPEF). (46): 76-85.
53. ROCKWOOD D.L.; DINUS R.J.; KRAMER J.M.; MCDONOUGH T.J. 1995. Genetic variation in wood, pulping and paper properties of *Eucalyptus amplifolia* and *E. grandis* grown in Florida, USA. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 February, Hobart, Australia. pp. 53-59.
54. SCHÖNAU A.P.G. 1991. Growth, yield and timber density of short rotation coppice stands of *Eucalyptus grandis*. *South African Forestry Journal*. (156): 12 -22.
55. STÖHR H. P.; MACKAY D. 1983. Wood characteristics of young *E. grandis* grown at Wilgeboom plantation Eastern Transvaal. CSIR Special Report HOUT 278. 28 p.
56. TAYLOR F.W. 1973a. Variation in the anatomical properties of south african grown *Eucalyptus grandis*. *Appita Journal*. 27 (3):171-178.
57. \_\_\_\_\_. 1973b. Anatomical wood properties of South African grown *Eucalyptus grandis*. *South African Forestry Journal*. (84): 20-24.
58. \_\_\_\_\_. 1984. Differences in the wood of *Eucalyptus grandis* grown in different parts of South Africa. *South African Forestry Journal*. (91): 14-18.

59. TOMAZELLO FILHO M. 1985. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatomica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E.grandis*. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales (IPEF). (29): 37-45.
60. TRUGILHO P.F.; MENDES L.M.; LIMA J.T. 1996. Influência da idade nas características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: (4º., Simpósio Internacional Sobre Ecossistemas Florestais. 13 a 16 de Agosto, Belo Horizonte, Brasil.) pp 71-72.
61. TUSET R.; DURAN F. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
62. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERIA AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. 96 p.
63. VAN DER SIJDE H.A. 1979. Wood density assessment of selected trees from breast height samples. Suid-Afrikaanse Bosboutydskrif. (108): 42.
64. VARGHESE M.; VISHNU; SUBRAMANIAN K.N.; BENNET S.S.R.; JAGADEES S. 1995. Genetic effectson wood and fibre traits of *Eucalyptus grandis* provenances. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 February, Hobart, Australia. pp. 64-66.
65. VASCONCELLOS DIAS R.L.; CLAUDIO DA SILVA Jr. E. 1985. Pulp and paper properties as influenced by wood density – Same species and age of *Eucalyptus*. In Papermaking raw material; their interaction with the production process and their effect on paper properties. Mechanical Engineering Publications. London. pp 7-36.
66. VIGNERON Ph.; GERARD J.; BOUVET J.M. 1995. Relationship basic density and growth in a fertilization trial with clones of *Eucalyptus* hybrids in Congo. In Proceedings of the Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry -IUFRO Conference, 19-24 February, Hobart, Australia. pp. 68-71.
67. WANG HUORAN; CHAI XIUWU; ZHENG YONGQI; ZANG DAOQUN; FANG YULIN; WANG WEIHUI; WANG H.R.; CHAI X.W.; ZHENG Y.Q.; ZANG D.Q.; FANG Y.L.; WANG W.H. 1994. Provenance variation in the growth rate and wood properties of *Eucalyptus grandis* in China. Forest Research 7 (2): 199-202. Tomado de: CAB Abstract. 1995.

68. WILKINS A.P. 1990. Influence of silvicultural treatment on growth and wood density of *Eucalyptus grandis* grown on a previous pasture site. *Australian Forestry*. 53 (3): 168-172.
69. \_\_\_\_\_; HORNE R. 1991. Wood density variation of young plantation grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*. 40 (1): 39-50. Tomado de: CAB Abstract. 1990-1991.
70. \_\_\_\_\_; KITAHARA R. 1991. Silvicultural treatments and associated growth rates, growth strains and wood properties in 12,5-year-old *Eucalyptus grandis*. *Australian Forestry*. 54 (1&2): 99-104.
71. WRIGHT J.A.; ENDO M. 1993. Wood density of four-year-old clones of *Eucalyptus grandis* from sixteen trials in Colombia. *Wood and fiber Science*. 25 (4): 333-338.
72. XAVIER A.; GONCALVES BORGES R. C.; CRUZ C. D.; CECON P. R. 1997. Parametros genéticos de características de qualidade da madeira em *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*. 21(1): 71-78.
73. ZOBEL B.J.; TALBERT J.T. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. 2ª. Reimp. México, Limusa. 545 p.

**10 ANEXOS**

**ANEXO 1. Cuadro N°1. Registros mensuales de temperaturas promedio (en °C) y precipitaciones acumuladas (en mm.)**

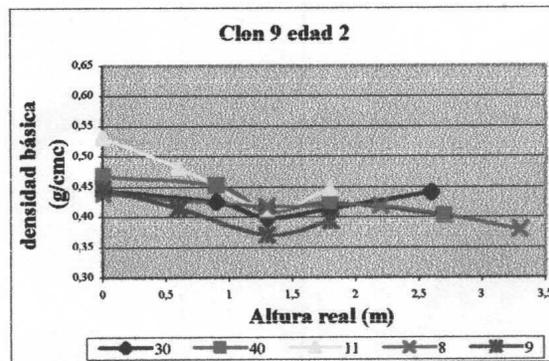
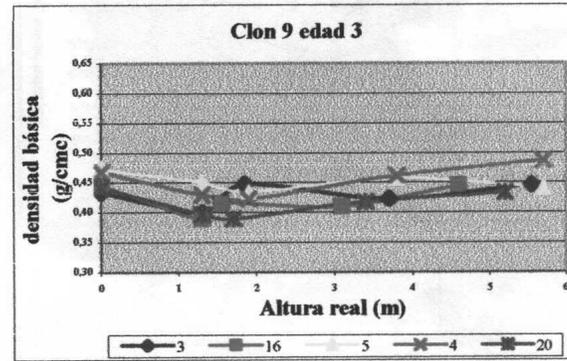
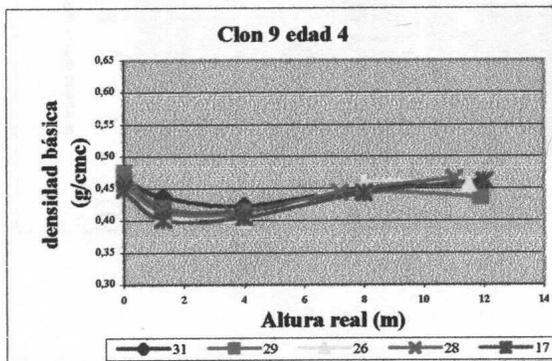
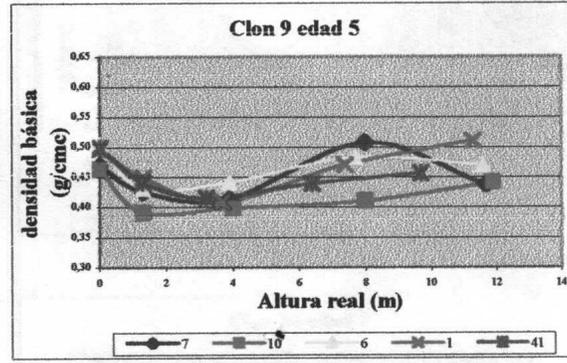
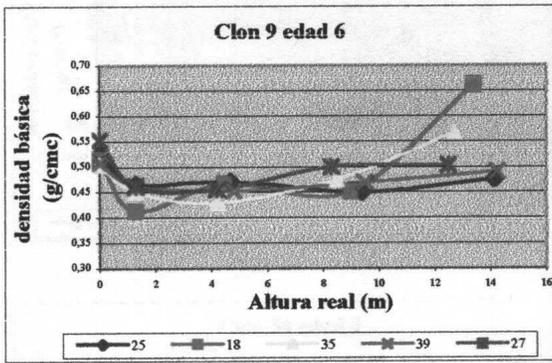
Año	Mes	Precipitaciones acumuladas (en mm.)	Temperaturas promedio (en °C)
1994	5	67	8,2
1994	6	62	7,2
1994	7	83	4,8
1994	8	38	5,4
1994	9	30	8,7
1994	10	119	9,2
1994	11	39	15,5
1994	12	n/d	n/d
1995	1	95	17,1
1995	2	29	13,1
1995	3	105	13,9
1995	4	95	10,4
1995	5	80	7,5
1995	6	39	3,1
1995	7	51	3,4
1995	8	0	6,8
1995	9	38	7,0
1995	10	142	8,3
1995	11	170	13,8
1995	12	21	15,7
1996	1	131	15,1
1996	2	61	15,7
1996	3	82	15,1
1996	4	262	11,3
1996	5	26	8,2
1996	6	34	3,1
1996	7	27	2,1
1996	8	20	5,3
1996	9	181	6,7
1996	10	17	11,0
1996	11	117	13,8
1996	12	140	16,5
1997	1	101	18,5
1997	2	63	15,3
1997	3	27	14,2
1997	4	48	10,9
1997	5	118	8,5
1997	6	70	5,8
1997	7	7	7,0
1997	8	92	5,8

**ANEXO 1. Continuación del Cuadro N°1. Registros mensuales de temperaturas promedio (en °C) y precipitaciones acumuladas (en mm.)**

Año	Mes	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
1997	9	46	7,2	20,6	
1997	10	360	11,0	23,0	
1997	11	198	14,3	25,8	
1997	12	182	15,1	27,5	
1998	1	282	15,5	27,9	
1998	2	77	16,6	27,4	
1998	3	112	14,0	25,8	
1998	4	138	13,5	22,8	
1998	5	66	10,3	20,0	
1998	6	62	5,5	17,0	
1998	7	101	7,8	17,6	
1998	8	38	7,5	17,8	
1998	9	65	6,4	19,6	
1998	10	54	10,5	25,3	
1998	11	150	12,0	26,3	
1998	12	135	13,9	28,6	
1999	1	139	15,0	28,6	
1999	2	231	16,0	29,4	
1999	3	143	17,3	28,6	
1999	4	32	10,3	21,3	
1999	5	26	8,4	20,1	
1999	6	127	5,7	16,9	
1999	7	151	5,2	16,4	
1999	8	20	6,5	18,8	
1999	9	5	8,3	22,4	
1999	10	28	10,0	23,4	
1999	11	7	12,5	26,8	
1999	12	60	14,7	31,4	
2000	1	45	17,7	34,1	
2000	2	190	16,3	31,4	
2000	3	68	13,6	27,5	
2000	4	366	13,2	23,9	
2000	5	272	9,9	19,4	
2000	6	57	8,3	18,0	
2000	7	116	4,1	14,3	
2000	8	81	7,1	18,9	
2000	9	191	8,1	19,6	
2000	10	137	11,5	23,0	
2000	11	66	12,3	26,2	
2000	12	139	14,4	29,9	

## ANEXO 2. Variación de la densidad con la altura en árboles individuales.

**Gráfico 1. Variación de la densidad básica (g/cm<sup>3</sup>) en función de la altura real para el clon X9.**



**Grafico 2. Variación de la densidad básica (g/cm<sup>3</sup>) en función de la altura real para el clon X34.**

