

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

**Indicadores de Calidad de Madera
Eucalyptus grandis de Río Negro, Uruguay
Contenido de Humedad, Densidad, Contracción y Largo de fibras**

**Wood Quality Indicators
Eucalyptus grandis from Río Negro, Uruguay**

Moisture Content, Density, Shrinkage, Fiber Length

Javier Doldán

Informe de Investigación N° 9

Marzo 2003



PRÓLOGO

En este Informe de Investigación se presenta una investigación realizada en el Sector Productos Forestales del LATU en Montevideo, Uruguay. Éste trabajo, se ha desarrollado en el marco del “Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales” con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).

Mediante esta serie de publicaciones, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), pretende contribuir a la difusión tecnológica como una herramienta para el desarrollo forestal.

AGRADECIMIENTOS

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

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

Al Ing. Toshinari Tanaka, Jefe de Proyecto JICA, por su supervisión.

A la Caja Notarial de Jubilaciones y Pensiones, por el apoyo brindado en esta investigación.

Al equipo técnico del Sector Productos Forestales del LATU, por su constante apoyo.

**INDICADORES DE CALIDAD DE MADERA EN
Eucalyptus grandis DE RÍO NEGRO, URUGUAY**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MATERIALES Y MÉTODOS	8
2.1. MATERIALES	8
2.2. MÉTODOS	9
2.2.1. Clasificación visual de trozas	9
2.2.1.a. Combado	9
2.2.1.b. Excentricidad de médula y porcentaje de duramen	10
2.2.1.c. Existencia de nudos	10
2.2.2. Obtención de probetas de ensayo	11
2.2.3. Distribución de contenido de humedad	12
2.2.4. Distribución de la densidad aparente básica	12
2.2.5. Contracción radial (β_r), tangencial (β_t) y volumétrica (β_v)	13
2.2.6. Longitud de fibras	14
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE TROZAS	15
3.1.1. Clasificación por defectos acumulados	15
3.1.2. Porcentaje de duramen	16
3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL FUSTE (CH)	16
3.2.1. Variación de CH desde médula a corteza	17
3.2.2. Relación entre CH y la velocidad de crecimiento	19
3.3. LONGITUD DE FIBRAS	19
3.3.1. Distribución desde médula a corteza y velocidad de crecimiento	20
3.3.2. Determinación de la transición entre madera juvenil y adulta	22
3.3.3. Resultados de longitud de fibra en madera juvenil y adulta	23
3.4. DENSIDAD APARENTE BÁSICA (D_{ab})	24
3.4.1. Comparación entre árboles y relación con la velocidad de crecimiento	24
3.4.2. Distribución de D_{ab} en el radio	25
3.4.3. Determinación de D_{ab} por infradensidad	26
3.4.4. Estimación de D_{ab} con penetración Pilodyn	27
3.4.5. Relación con el contenido de humedad	28
3.4.6. Relación con la longitud de fibra	28
3.5. CONTRACCIÓN TANGENCIAL, RADIAL Y VOLUMÉTRICA	29
3.5.1. Contracción tangencial y radial desde médula a corteza	29
3.5.2. Anisotropía o relación entre contracción tangencial y radial (β_t/β_r)	32
3.5.3. Punto de saturación de las fibras (PSF) y coeficiente de contracción	33
3.5.4. Relación con otras propiedades físicas fundamentales	35
3.6. COMPARACIÓN CON OTRAS ESPECIES COMERCIALES	36
3.6.1. Densidad Aparente Básica	36
3.6.2. Contracción volumétrica total y anisotropía	37
4. CONCLUSIONES	39
5. BIBLIOGRAFÍA	40

**INDICADORES DE CALIDAD DE MADERA EN
Eucalyptus grandis DE RÍO NEGRO, URUGUAY**

RESUMEN

La calidad de la madera se determina mediante propiedades físicas, mecánicas y químicas que son requeridas para un determinado uso final. Para desarrollar estándares de calidad es necesario un conocimiento profundo de dichas propiedades para cada especie. Con este propósito, este trabajo presenta las propiedades físicas fundamentales de una plantación de *Eucalyptus grandis* del Noroeste de la República Oriental del Uruguay.

Palabras Clave: contenido de humedad, densidad, contracción, longitud de fibras.

SUMMARY

Wood quality is determined by physical, mechanical and chemical properties that are required for each end use. In order to develop quality standards it is necessary to increase the knowledge of these properties from several species. The present report, presents some fundamental physical properties of a *Eucalyptus grandis* plantation from Northwest of República Oriental del Uruguay.

Key words: moisture content, density, shrinkage, fiber length.

1. INTRODUCCIÓN

En el Uruguay, el área forestada hasta el año 2002 asciende a aproximadamente 650000 hectáreas, que representan aproximadamente el 25% del área total destinada a la forestación. El 20% de las plantaciones amparadas bajo la Ley forestal del año 1987, corresponde a *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* mientras que las de *Eucalyptus spp.* comprenden el 80%. En lo que respecta a las especies de eucalipto, las más plantadas son *E. globulus ssp. globulus* y *E. grandis*; siendo su principal destino la madera para pulpa. Sin embargo, el *E. grandis* ha presentado cualidades importantes como materia prima en el campo de la madera aserrada.

En los próximos años, las oportunidades de inserción de productos de *E. grandis* en el exterior aumentarán. Hacia el año 2010 se espera que la oferta de madera en países asiáticos como Indonesia y Malasia, así como también otros países africanos, decrezcan significativamente, por lo que las plantaciones de rápido crecimiento en Sudamérica serán una fuente importante de abastecimiento para los mercados mundiales.

Para desarrollar estos mercados de la madera aserrada, se deberán unificar esfuerzos en busca de objetivos comunes, ya sea en el generamiento de plantaciones sustentables de buena calidad, en el mejoramiento genético de las especies de importancia, como en el estudio de caracterización de las mismas.

En Uruguay, el conocimiento detallado de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las plantaciones de eucalipto es muy escaso. En este informe se estudian diferentes indicadores de calidad de la madera de *Eucalyptus grandis* obtenida en una plantación del departamento de Río Negro (cercano al límite con Paysandú) al Noroeste de la República Oriental del Uruguay. Los indicadores elegidos son los siguientes: contenido de humedad, densidad aparente básica, contracciones (lineales y volumétricas) y longitud de fibras. El objetivo de este trabajo, es presentar información a los diferentes sectores de la industria forestal, con el propósito de incrementar el conocimiento sobre la calidad de la madera disponible actualmente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

El material primario consiste en 21 trozas basales de *Eucalyptus grandis*, obtenidas en un muestreo en el mes de enero de 2001. Las características del monte muestreado son las siguientes:

- EDAD: **18 años**, plantación en la primavera de 1982, corte en enero de 2001.
- ORIGEN DE SEMILLA: Bañado Medina Cerro Largo – Uruguay.
- DENSIDAD DE PLANTACIÓN: 1100 árboles/ha.
- ALTURA PROMEDIO: 27 metros
- DAP promedio: 35 cm

La selección visual de los árboles se realizó de acuerdo a una clasificación por diámetros, rectitud de fuste y sanidad del árbol. De cada uno de estos árboles se cortaron las trozas basales de 3 m de longitud. De las 21 trozas obtenidas, para realizar este trabajo se eligieron 15 trozas, clasificándolas en tres clases diamétricas, cuyas características más relevantes se detallan en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Características principales de las trozas.

CLASE	TRES CLASES DIAMÉTRICAS (por DAP en cm con corteza)														
	(24 – 32)					(32 – 38)					(38 – 48)				
N° de Árbol	17	5	10	21	4	20	3	11	1	19	12	6	18	13	14
*DAP (cm)	22,5	26,5	27,0	27,5	31,0	32,5	33,0	33,0	33,5	36,5	39,0	39,0	40,0	42,5	43,0
Altura de árbol (m)	23,0	27,9	26,0	28,2	29,8	31,0	26,4	29,0	28,5	28,0	30,0	29,6	27,0	30,0	30,0
Diámetro menor (cm)	21,2	21,9	25,0	23,0	27,0	29,3	27,8	30,2	30,0	33,0	35,0	34,5	32,7	37,1	41,0
Diámetro mayor (cm)	22,9	28,5	27,7	28,0	31,2	33,9	34,7	34,2	35,8	37,2	39,0	40,3	40,3	44,3	46,1

*DAP: diámetro a la altura de pecho (1,3 m desde el piso).

2.2. MÉTODOS

2.2.1. Clasificación visual de trozas

La clasificación visual tiene como cometido identificar y cuantificar los defectos de las trozas estudiadas. La evaluación de los tipos y cantidad de defectos será relevante en lo que refiere a cuantificar variaciones en la calidad de la madera. Las irregularidades o imperfecciones pueden afectar las propiedades físicas, mecánicas o químicas, determinando limitaciones en posibles aplicaciones. Existen distintos tipos de defectos, causados naturalmente o por agentes externos. En este caso nos centraremos en las siguientes características:

- Combado de troza
- Excentricidad de médula y porcentaje de duramen
- Existencia de nudos

2.2.1.a. Combado: se determina la curvatura del fuste mediante la medida de la altura máxima de arqueado (h), que se da a una distancia variable (L) del extremo menor (Ver Figura N°1 Caso A). Se debe tener en cuenta que al clasificar trozas basales, en el extremo mayor, se puede dar una curvatura exagerada, debido a la formación de las raíces (Caso B). En estos casos, se debe tomar un largo de referencia (L') que desprecie la mencionada deformación y no el largo total de la troza (L_{total}).

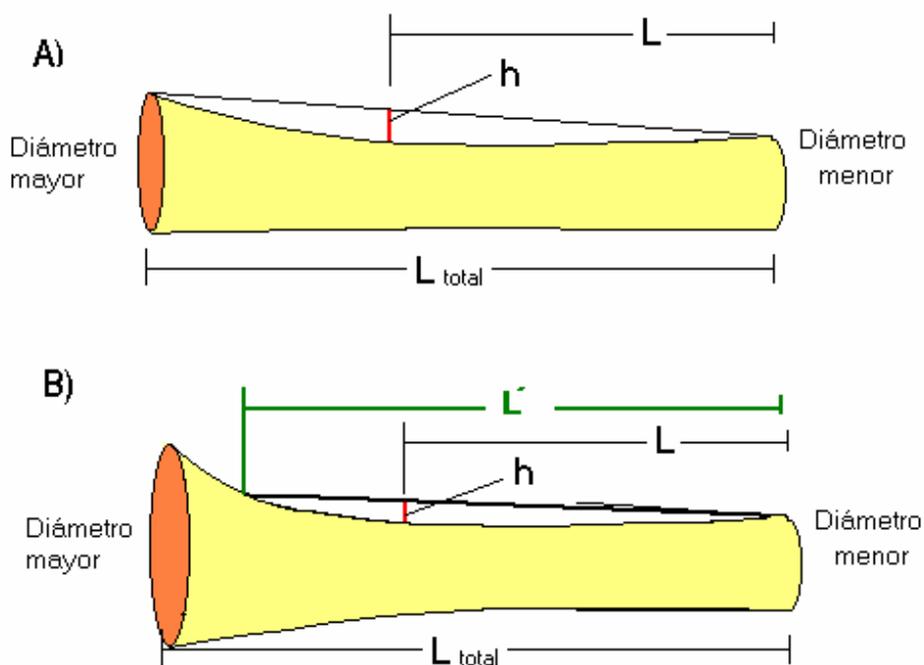


Figura N°1: Determinación de combado de trozas.

2.2.1.b. Excentricidad de médula y porcentaje de duramen: en ambas caras de la troza (mayor y menor) se determina el lugar en que se encuentra el centro geométrico (G). A la distancia entre dicho punto y la médula (M) se le llama excentricidad. Se determinan el diámetro mayor y menor en cada cara, sobre el diámetro mayor de cada una (D_{mayor}) se miden dos radios ($R1$ y $R2$) y los radios de duramen ($r1$ y $r2$). Ver Figura N°2.

Se puede obtener el porcentaje de duramen relacionando las áreas teóricas obtenidas de los promedios de radios de duramen

$$\% \text{Duramen} = (\pi r^2) / (\pi R^2) * 100$$

Donde: Promedio de radios de duramen: $r = (r1+r2)/2$
 Promedio de radios totales: $R = (R1+R2)/2$.

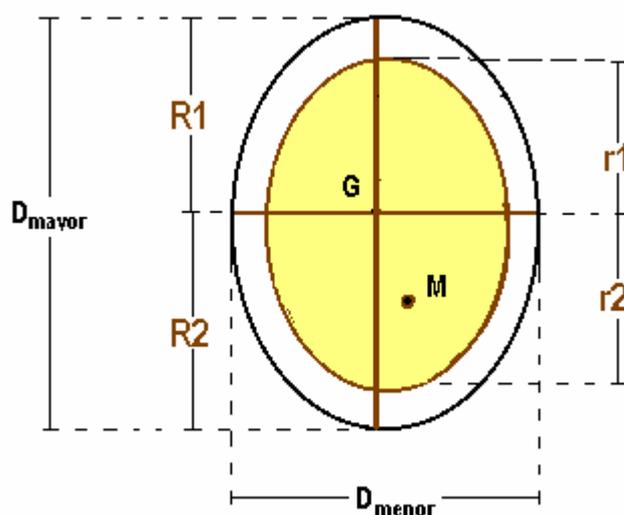


Figura N°2: Determinación de excentricidad y porcentaje de duramen.

2.2.1.c. Existencia de nudos: se deben cuantificar la presencia de nudos así como definir su posición en la troza. La forma de precisar la ubicación de cada nudo es la siguiente: tomando como referencia la misma línea en que se determina la curvatura máxima, se toma la distancia lineal al extremo menor de la troza ($L1$) y la distancia a la línea de referencia siguiendo el contorno de la troza en sentido horario ($P1$), observando la troza desde el extremo menor (ver Figura N°3). Por otro lado se debe obtener el diámetro menor de cada nudo (d) con el cual se determina la relación con el diámetro menor promedio.

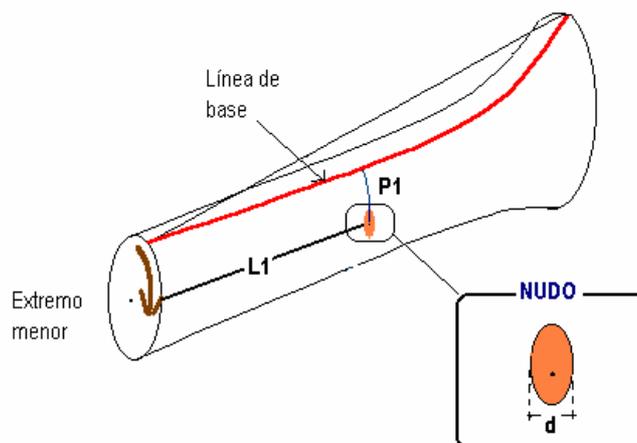


Figura N°3: Posición y dimensiones de nudos en trozas.

2.2.2. Obtención de probetas de ensayo

Se cortó un metro de la troza de 4 metros de largo, en el extremo mayor (altura 2 a 3m). Este metro se aserró en primera instancia quitando dos costaneros y centrando la médula en un bloque de 15cm de espesor (ver Figura N°4). Posteriormente, se eligen las áreas libres de nudos u otros defectos (como rajaduras, bolsas de quino, etc) y se obtienen discos de aproximadamente 5cm de espesor. De dichos discos se pueden obtener las diferentes probetas para cada una de las propiedades a estudiar.

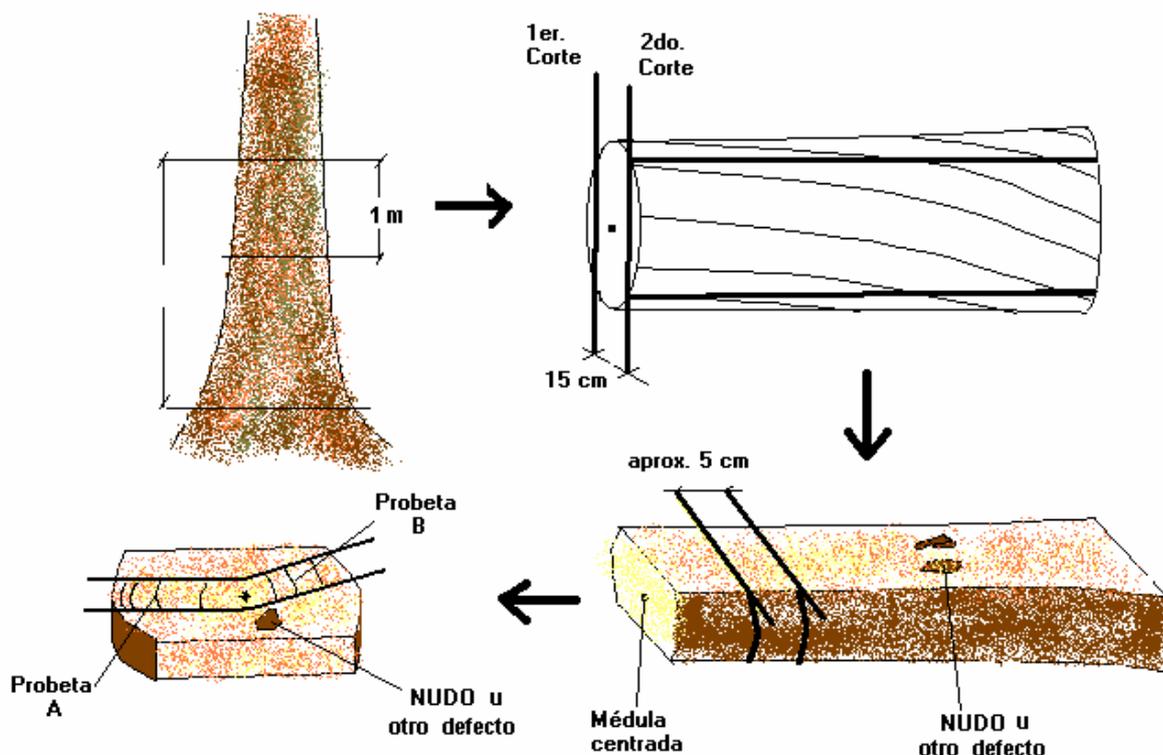


Figura N°4: Obtención de probetas de ensayo.

2.2.3. Distribución de contenido de humedad

El contenido de humedad (CH) de las trozas, fue determinado mediante el método convencional o de pesadas, basado en la diferencia en el peso de cada probeta antes y después de secado a estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{CH} = (\text{Ph} - \text{Pa}) / \text{Pa} * 100$$

Donde: CH : contenido de humedad, en porcentaje.
Ph: Peso inicial de la muestra, antes de secar.
Pa: Peso final, peso de madera anhidra.

La balanza utilizada es una Mettler-Toledo PG503-S con una precisión de 0,001 gramos. Se determina la distribución del contenido de humedad desde la médula a la corteza, realizando una diferenciación entre la albura y el duramen. Para llevar a cabo dicha comparación, se decidió obtener cuatro probetas del duramen y dos que solamente contuvieran albura. El corte de las probetas se llevó a cabo mediante una cuchilla especial, a la cual se le puede regular su curvatura, permitiendo así realizar el corte siguiendo el dibujo del anillo de crecimiento (ver Figura N°5).



Figura N°5: Fotografía de cuchilla formadora de probetas radiales.

2.2.4. Distribución de la densidad aparente básica

La densidad aparente básica (D_{ab}) es la relación entre el peso en gramos de madera anhidra (Pa) y el volumen en centímetros cúbicos de la madera verde (V_v).

$$D_{ab} = Pa / V_v$$

Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- **Método de inmersión en agua:** se cortaron 5 probetas desde la médula a la corteza intentando conservar en cada una de ellas al menos 3 anillos de crecimiento. Para el corte se utilizó la misma herramienta que para la obtención de probetas de contenido de humedad. La medición se basa en el principio de Arquímedes consiste en 3 pesadas. La primera se trata del peso húmedo de la madera (P_v), la segunda del peso sumergido en agua (P_s) y por

último el peso anhidro (Pa). La ecuación de obtención de la densidad aparente básica es la siguiente:

$$D_{ab} = Pa / (Pv - Ps)$$

- **Método de máximo contenido de humedad o “infradensidad”:** consiste en relacionar el peso de la probeta totalmente saturada en agua (Pts) con su peso anhidro (Pa), asumiendo como constante la densidad del material componente de la pared celular (1,53g/cm³). Se obtiene la infradensidad de la siguiente manera:

$$D_{ab} = 1/((Pts-Pa)/Pa + 1/1,53)$$

- **Método indirecto – penetración de émbolo (Pilodyn):** el Pilodyn es un instrumento de origen suizo, que consiste básicamente en un émbolo de metal de 2,5mm de diámetro, que es impulsado con una energía de 6J, el cual impacta sobre la madera produciéndose una penetración. Ésta se lee en milímetros en una ventana del equipo. Se estudia la medida de la penetración del Pilodyn como una herramienta para estimar la densidad del árbol en pie. En anteriores publicaciones (Perez del Castillo; 2001 y Böthig; 2001) la correlación encontrada es alta por lo que se espera en este caso encontrar una buena relación.

2.2.5. Contracción radial (βr), tangencial (βt) y volumétrica (βv)

La madera sufre un cambio de volumen al producirse una desorción o eliminación de moléculas de agua constitutivas entre el punto de saturación de las fibras (PSF) y el estado anhidro (seco a 103°C). Al eliminar las moléculas de agua de los espacios submicroscópicos y de la pared celular por evaporación y difusión, se produce un acercamiento de las micelas, lo que induce a la contracción de la madera. Al ser la madera un material anisotrópico, existen diferencias entre la contracción en dirección tangencial, radial y longitudinal, presentando normalmente rangos de valores de 3,5-15% : 2,4-11% : 0,1-0,9% respectivamente. En este caso, el *E. grandis* estudiado no presenta madera de reacción, por lo que la contracción longitudinal no es considerada significativa (menor a 0,1%). Se estudia solamente la contracción radial y tangencial tomándose como contracción volumétrica la suma de ambas contracciones.

Las probetas se preparan según JIS (JIS Z 2101 – 1994), son piezas prismáticas cuyas dimensiones en estado verde son de 30x30x5 mm (ver Figura N°6)

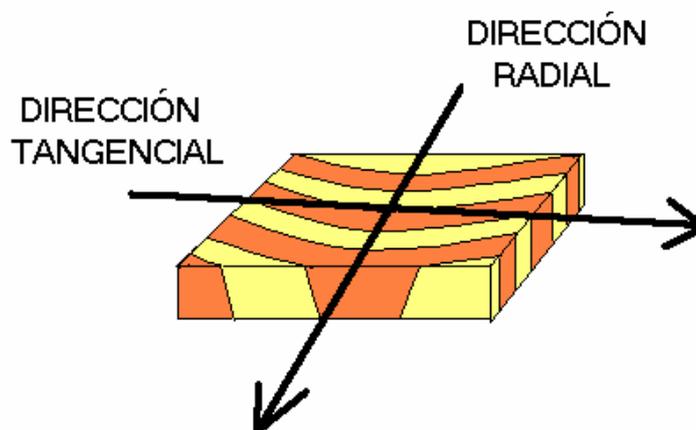


Figura N°6: Direcciones de medición en probeta.

El cálculo de la contracción se lleva a cabo mediante la medición de las dimensiones en dirección radial y tangencial (ver Figura N°6) primero en estado verde y luego a diferentes humedades hasta llegar al estado anhidro. Para llegar a los estados de humedad intermedios, se utiliza una cámara climatizada (Nihon Freezer) y para llegar al estado anhidro una estufa de circulación forzada (Yamato DK600).

Una vez obtenidas las dimensiones en los distintos estados de humedad, la contracción se calcula de la siguiente manera:

$$\beta_i = (D_i - d_i) / D_i * 100$$

Donde: β_i : contracción tangencial (β_t) o radial (β_r) (%)
 D_i : dimensión de probeta a CH inicial (dirección tangencial o radial) (mm)
 d_i : dimensión de probeta a CH final (dirección tangencial o radial) (mm)

La contracción volumétrica se obtiene sumando las contracciones en los tres sentidos (tangencial, radial y longitudinal). Sin embargo, al considerar que la contracción longitudinal es despreciable, el cálculo de la contracción volumétrica (β_v) se realiza de la siguiente forma:

$$\beta_v \cong \beta_t + \beta_r$$

2.2.6. Longitud de fibras

Las fibras son uno de los componentes más importantes de la madera, confiriendo con la lignina como cementante, la forma de la misma. A medida que se da el crecimiento por capas del árbol, se generan fibras de mayor longitud. El estudio de la distribución de esta propiedad en el sentido radial (desde la médula hasta la corteza), puede determinar la zona de transición en la cual la madera pasa de ser juvenil a adulta, así como también podría ser un indicador de la calidad de la misma.

Las probetas se obtienen de la siguiente manera:

- ❖ Obtención de listón radial de espesor no menor a 20 mm.
- ❖ Secado al aire
- ❖ Elección de posición en radio (cercano a médula, cercano a corteza y posiciones intermedias).
- ❖ Corte de probetas en sentido longitudinal (sección no mayor a 2mm de lado).

Para estudiar la mencionada distribución radial, se toman al menos 2 probetas intermedias variando dicha cantidad según la magnitud del radio. En uno de los casos se toman 10 probetas en total, para estudiar la mencionada zona de transición.

Previamente a la determinación de la longitud de las fibras, se realiza una maceración de la probeta en solución de Jeffrey 10% (10% HNO₃ y 10% CrO₃). Al producirse una separación de las fibras por la dilución de la lignina, es posible medir una gran cantidad de fibras observándolas en un proyector de perfiles. En este caso se midieron 30 fibras por posición en el radio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE TROZAS

Una vez descortezadas las trozas, se realizó la clasificación visual en donde se examinan los defectos más importantes como ser el combado de la troza y existencia de nudos, así como medidas relevantes ya sea radios de duramen y totales como se indica en 2.1.1.

3.1.1. Clasificación por defectos acumulados: Se determina un valor numérico representativo de los defectos para cada troza (DAT), mediante el cual es posible la comparar y clasificar las mismas. Una vez obtenidas las medidas de los diferentes defectos, se realizan los siguientes cálculos:

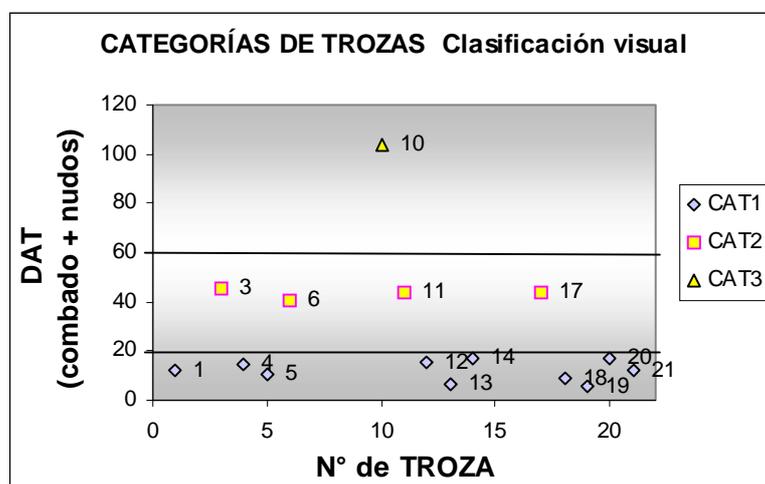
Defecto combado (DC): $DC = h / D_{menorprom.} * 100$

Defecto por nudo (DNi): $DNi = di / D_{menorprom.} * 100$

Defectos acumulados totales (DAT): $DAT = DC + \sum DNi$

Donde: h = altura máxima de curvatura en cm
di = diámetro menor de cada nudo en cm
D_{menorprom.} = diámetro menor de troza en cm (promediando extremos)

En la Gráfica N°1 se observa el valor de DAT obtenido para cada troza. De este ordenamiento se puede observar a simple vista la existencia de tres clases o categorías distintas a las que se las denomina CAT1, CAT2 y CAT3.



Gráfica N°1: Categorías de trozas luego de la clasificación visual.

CAT1: En esta clase se encuentran aquellas trozas que presentaron un DAT < 20

Al ser trozas basales, era de esperar que la mayoría de ellas presentaran una baja cantidad de nudos. Por esta razón, la mayor parte de las trozas (67%) se acumulan en esta categoría.

CAT2: Se determina una banda de 20 < DAT < 60

Existen 4 trozas que se ubican en esta franja, en la cual existen una cantidad de nudos intermedia.

CAT3: Con DAT>60 se encuentra una sola troza (N°10) presentando 6 nudos.

En la Tabla N°2 se puede observar que las curvaturas de las trozas (h) (como los DC) son pequeñas con un máximo de 4,4 cm y un promedio de 2,7cm no influyendo en el DAT. Por otro lado, la cantidad de nudos determina en el caso de la troza N°10 un DAT elevado con un $\Sigma DN_i = 96$ (CAT3) ya que el $d_{m\acute{a}x}$ (diámetro de nudo máximo) es de 5cm. Sin embargo, en el caso de la troza N°17 la cantidad de nudos es la misma, pero el $d_{m\acute{a}x}$ es sensiblemente menor, por lo que la troza toma una categoría intermedia (CAT2) con un $\Sigma DN_i = 37$. Se evaluó la relación del DAT con las propiedades físicas fundamentales estudiadas más adelante, no encontrándose correlación con ninguna de ellas.

Tabla N°2: Clasificación visual de trozas.

CAT	N°Troza	DAT	N°nudos	$d_{m\acute{a}x}$ (cm)	ΣDN_i	h (cm)	DC	$D_{menorprom}$ (cm)	%Duramen
CAT1	19	6	0	0	0	2	6	31,3	70
	13	6	0	0	0	2,4	6	29,2	52
	18	9	0	0	0	3	9	27,5	75
	5	10	0	0	0	2,3	10	22,2	68
	1	12	1	1	3	2,9	9	35,5	54
	21	13	0	0	0	3	13	25,0	49
	4	15	0	0	0	4,1	15	30,7	59
	12	16	2	2	9	2,5	7	35,0	65
	14	17	1	4,3	11	2,5	6	37,5	73
	20	17	1	1,5	5	3,4	12	40,5	56
CAT2	6	41	2	6	28	4,4	12	21,0	68
	11	43	3	8,5	37	2	7	34,0	72
	17	44	6	2	37	1,5	7	33,8	52
	3	46	3	8,5	39	2	7	29,2	61
CAT3	10	104	6	5	96	2	8	24,0	60

3.1.2. Porcentaje de duramen: Se evalúa el porcentaje de duramen para cada troza. Por supuesto que en madera de latifoliadas, es deseable encontrar un alto porcentaje de duramen, dado que su durabilidad natural, hace que sea ideal para usos finales como material para construcción de casas de madera y postes impregnados pues el volumen de impregnación (albura) es menor. En este caso, el *E. grandis* presenta un promedio de 62% de duramen, observando la Tabla N°2, se encuentra un mínimo de 49% en el árbol 21 y un máximo de 75% en el árbol 18. En este caso no se observa ninguna relación entre el porcentaje de duramen y la velocidad de crecimiento.

3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL FUSTE (CH):

La determinación del contenido de humedad de la madera del árbol en pie es de importancia dado que de ella dependen la resistencia al ataque hongos. Económicamente su importancia radica en el efecto que infiere a propiedades como el peso específico aparente de la madera y por lo tanto a procesos de transporte, almacenamiento y secado. En la Tabla N°3 se observan los resultados obtenidos para cada troza especificando el contenido de humedad promedio, en duramen y albura.

Se incluyen los promedios, máximos y mínimos de todos los árboles, donde se obtuvieron rangos de valores muy similares entre duramen y albura.

Tabla N°3: Valores de CH promedio, duramen y albura.

N° de árbol	Contenido de Humedad CH (%)		
	Promedio	Duramen	Albura
5	99,7	99,0	101,2
20	102,3	104,5	97,8
4	104,8	99,2	116,0
18	105,7	106,5	104,2
1	109,9	104,1	121,7
10	111,6	104,7	125,3
6	114,5	107,9	127,6
13	115,9	120,5	106,8
3	118,8	122,7	111,1
19	120,8	120,6	121,2
21	122,9	124,8	119,2
14	130,3	138,1	114,9
12	130,8	131,5	129,5
11	135,7	128,2	150,5
17	150,4	142,5	166,2
Promedio	118,3	117,0	120,9
Mínimo	99,7	99,0	97,8
Máximo	150,4	142,5	166,2

La obtención de rangos tan amplios de contenido de humedad, corrobora la posibilidad de encontrar dificultades en los procesos de secado del *E. grandis*. La dificultad radica en obtener contenidos de humedad finales homogéneos, por lo que se deberán estudiar programas de secado adecuados.

3.2.1. Variación de CH desde médula a corteza: Para el estudio desde la médula a la corteza, se mide la humedad de seis probetas siendo las últimas dos (5 y 6) pertenecientes a la albura. De esta manera, es posible estudiar la distribución para ambos radios (A y B) diferenciando la albura y el duramen. Al obtener los datos para cada probeta se observan diferentes distribuciones, no existiendo un patrón de comportamiento común entre las distintas trozas. Dado este comportamiento dispar, se intenta realizar una clasificación implementando un simple método. Éste consiste en determinar las pendientes de las distribuciones A y B de cada árbol, tomando como valor principal el promedio de ambas. Se determinan entonces tres clases según la inclinación de la distribución:

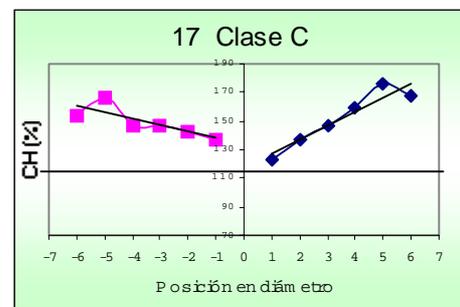
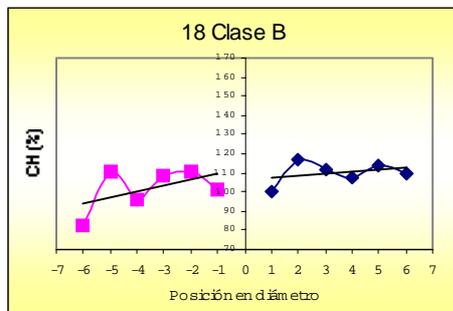
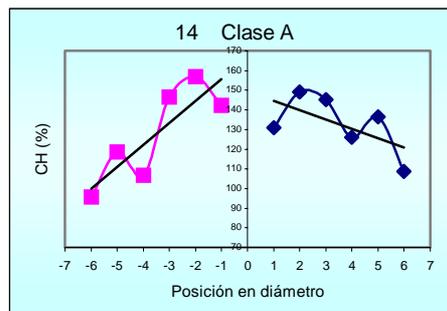
Clase A: **pendiente < -3** donde la humedad es mayor en el duramen que en la albura.

Clase B: **-3 < pendiente < 3** puede considerarse una humedad constante en todo el radio.

Clase C: **3 < pendiente** donde la humedad es menor en el duramen que en la albura.

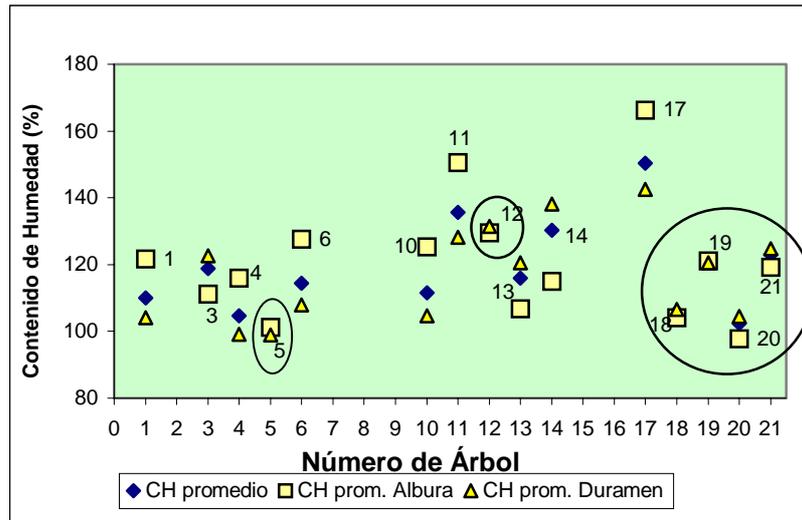
Tabla N°4: Clasificación por CH.

	N° Troza	Humedad promedio (%)	Pendiente promedio
CLASE A	14	130	-7,94
	13	116	-4,34
	3	119	-3,34
	21	123	-3,21
CLASE B	12	131	-1,80
	20	102	-1,41
	18	106	-0,95
	5	100	-0,22
	19	121	1,59
CLASE C	4	105	2,71
	10	112	3,99
	6	114	4,75
	1	110	5,02
	17	150	7,23
	11	136	9,50



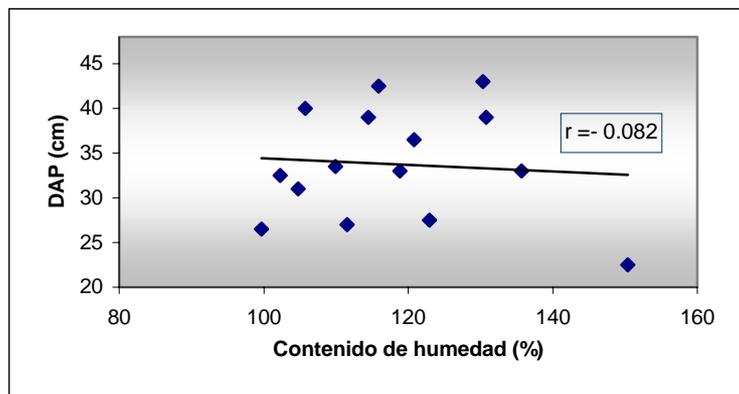
Gráfica N°2: Clasificación de probetas por distribución de CH.

En la Tabla N°4 la clasificación de los árboles estudiados y en la Gráfica N°2 se observan ejemplos de las tres clases de distribución. Otra forma de visualizar las diferentes distribuciones se puede apreciar en la Gráfica N°3 donde se observan el resultado de CH diferenciado para duramen, albura y promedio en cada troza. Se marcan con un círculo aquellos árboles en los cuales no se observan diferencias entre duramen y albura.



Gráfica N°3: Comparación del CH entre albura y duramen.

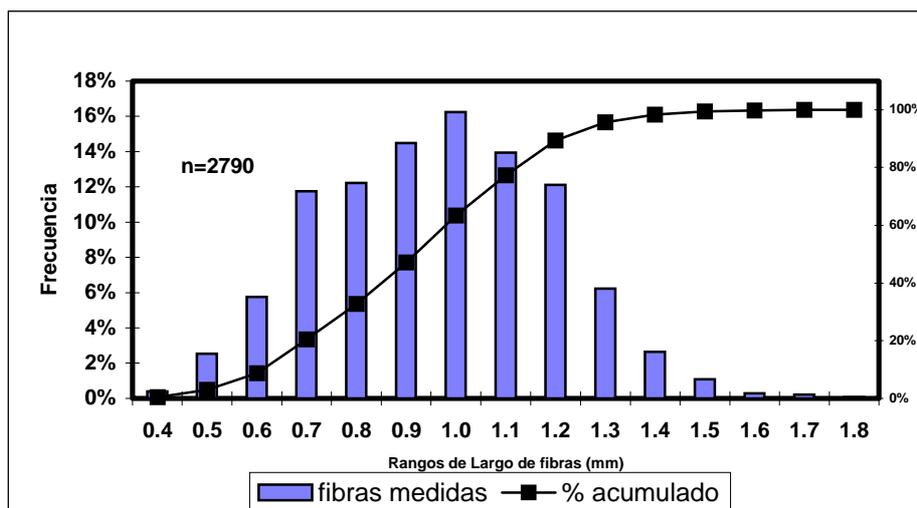
3.2.2. Relación entre CH y la velocidad de crecimiento: La velocidad de crecimiento es una característica excluyente en la elección de árboles para mejoramiento genético. Esta es la razón por lo que se debe estudiar su influencia en los diferentes indicadores de calidad de madera. En el rango de diámetros estudiado, el contenido de humedad no presenta una relación definida con la velocidad de crecimiento. Esto se corrobora en la Gráfica N°4, donde la correlación entre el DAP (diámetro a la altura del pecho) y el contenido de humedad promedio es muy baja.



Gráfica N°4: Relación entre CH y la velocidad de crecimiento.

3.3. LONGITUD DE FIBRAS:

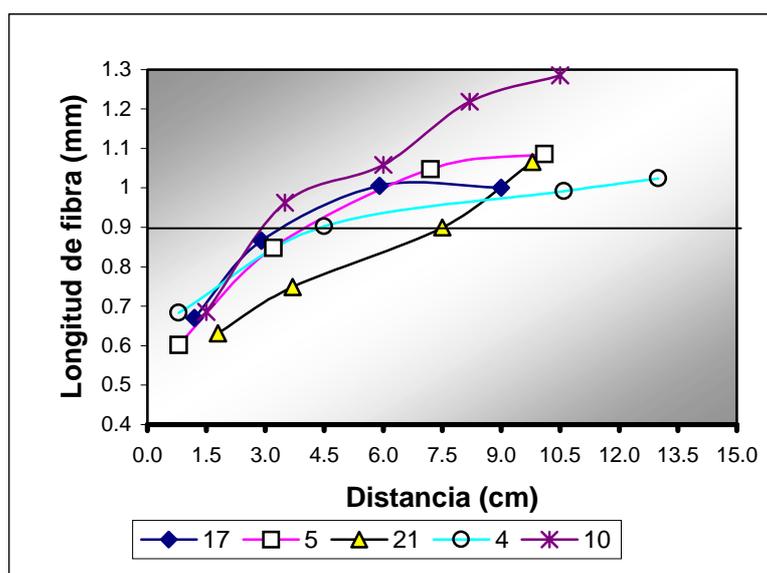
La longitud de fibras no puede ser considerada aún como indicador de calidad de madera. Esta característica es muy importante, sin embargo, para la calidad de la pulpa de madera y el uso final de la misma ya sea papel u otros. Desde el punto de vista de la investigación a la cual se apunta en este trabajo, el largo de fibra será útil para determinar la zona de transición radial en la cual se da el cambio de madera juvenil a madera adulta. La madera adulta no sólo ostenta valores de longitud de fibra mayores, sino que es una madera de mejor calidad ya sea en propiedades físicas y mecánicas.



Gráfica N°5: Histograma para longitud de fibras.

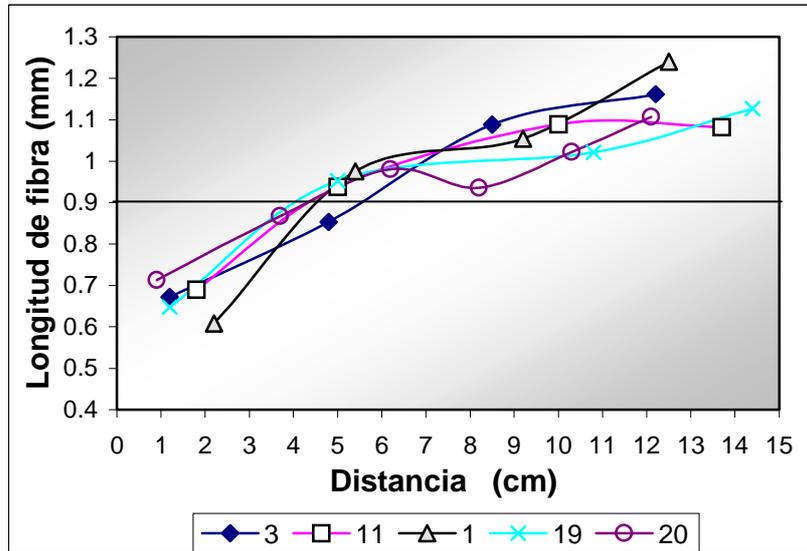
Se determinó la longitud de un número elevado de fibras (n=2790) de diferentes posiciones desde médula a corteza. Al clasificar en distintos rangos y al construir un histograma (ver Gráfica N°5), se puede observar una distribución gaussiana con una media aproximada a 1,0 mm de longitud.

3.3.1. Distribución desde médula a corteza y velocidad de crecimiento: Dentro de cada árbol, se determina la longitud de fibra en diferentes posiciones desde médula a corteza. De esta forma es posible determinar la distribución radial de esta propiedad. Se constató que las fibras cercanas a la médula presentan promedios de aproximadamente 0,65mm y las cercanas a la corteza 1,1mm. Es claro que cada árbol presenta un punto de transición diferente así como una velocidad para generar madera adulta diferente. Por lo tanto, se deberán estudiar individualmente los árboles de las distintas clases diamétricas (baja, media y alta). Se busca estudiar el incremento de la longitud de fibras en dirección radial (desde médula a corteza). Con este fin, se toma arbitrariamente un largo de fibra fijo cercano a la transición (0,9 mm) para comparar las distancias radiales en centímetros, a la cual llega cada árbol a generar fibras de dicha longitud



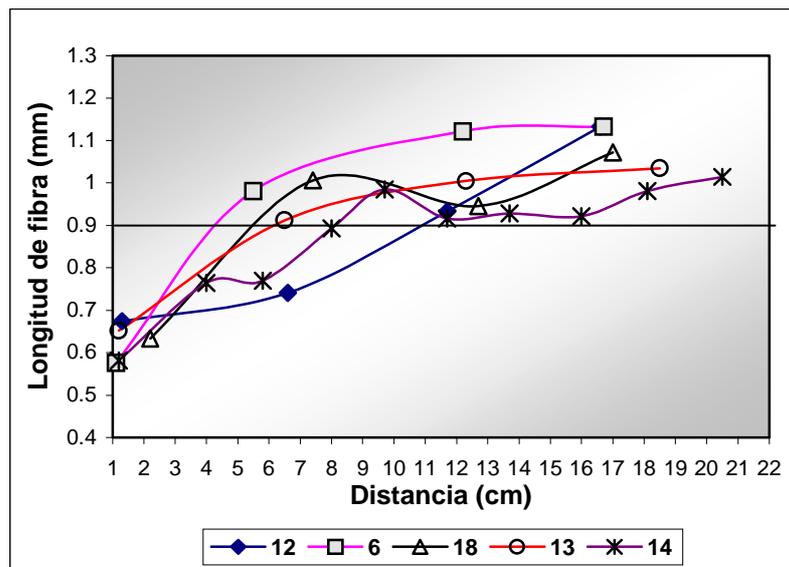
Gráfica N°6: Distribución de long. de fibras en clase diamétrica baja (24-32 cm DAP).

Observando la Gráfica N°6 se encuentra la distribución de los árboles pertenecientes a la clase diamétrica baja. Claramente se advierte una uniformidad en las distribuciones, excepto el árbol 21 que presenta una pendiente inicial menos pronunciada. Esto se ratifica comparando a 0,9 mm donde los árboles 17, 5, 4 y 10 llegan a un radio de aproximadamente 3cm, mientras que el árbol 21 llega a los 7,5cm. En este caso se puede decir que el mejor árbol sería el N°10 presentando un crecimiento más acelerado de la longitud de fibra y llegando a valores cercanos a 1,3mm cercanos a la corteza.



Gráfica N°7: Distribución de long. de fibra en clase diamétrica media (32 –38 cm DAP).

De la misma forma se puede observar en la Gráfica N°7, los 5 árboles de diámetros medios, presentando distribuciones similares para los árboles 1, 11, 19 y 20 llegando a 0,9mm a los 4,5cm de la médula, mientras que el árbol 3 presenta una pendiente menos pronunciada llegando a los 5,5cm.

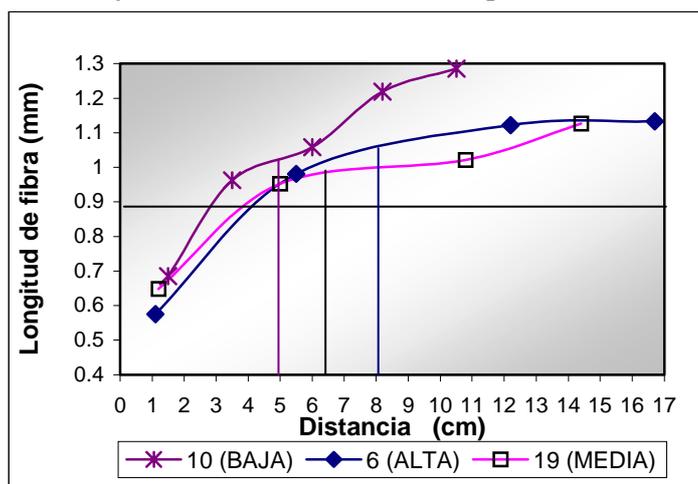


Gráfica N°8: Distribución de long. de fibra en clase diamétrica alta (38 –48 cm DAP).

Por último, en el caso de la clase diamétrica alta (Gráfica N°8) se percibe una disparidad en lo que refiere a las pendientes de las curvas de distribución de la longitud de fibra, notando un rango de 4,0 a 10,5cm a los que los diferentes árboles llegan a los 0,9 mm de longitud de fibra. En el caso del árbol 6 la velocidad es la más pronunciada.

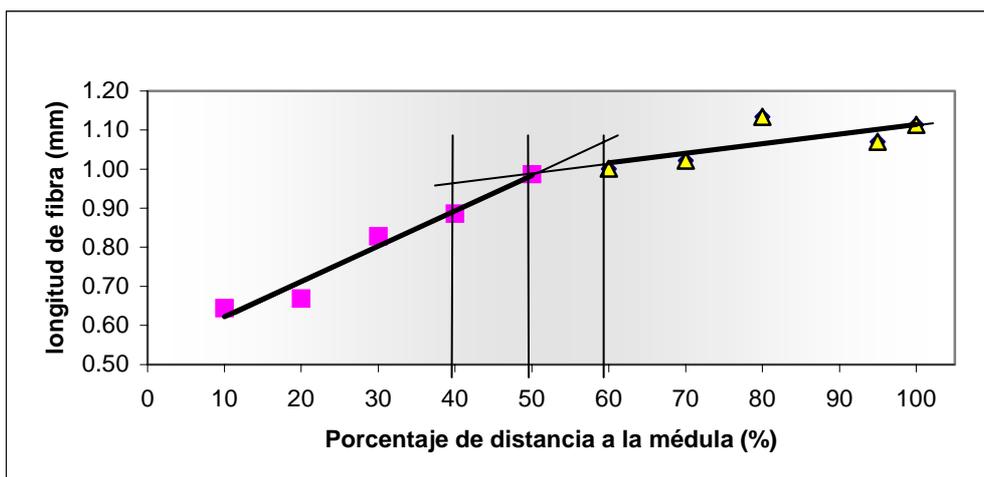
La posibilidad de encontrar diferencias significativas entre árboles, ya sea en valores medios de longitud de fibra, transición entre madera juvenil y adulta, así como la velocidad para llegar a generar madera adulta, sugieren la posibilidad de utilizar la longitud de fibra como indicador para la elección de árboles plus para mejoramiento genético. Desde este punto de vista, los árboles 6, 10 y 19 serían los mejores en cada clase diamétrica.

3.3.2. Determinación de la transición entre madera juvenil y adulta: Como se expresó anteriormente, la determinación de la zona de transición es de suma importancia, dado que existen diferencias significativas en la calidad de la madera juvenil y adulta. Para ello, se toma en cuenta la forma de la curva de distribución. Cuando la curva comienza a presentar datos estables o sea que los valores de la longitud de la fibra forman una meseta se considera que se ha llegado a la zona de madera adulta. En la Gráfica N°9 se presentan las curvas de los mejores árboles de cada clase diamétrica. Es claro que a mayor velocidad de crecimiento (mayor diámetro), superior será el volumen de madera adulta obtenido, por ejemplo, en el árbol 10 (clase baja) se obtendría un espesor de 6,3cm de madera adulta. De la misma forma, del árbol 19 de clase diamétrica media, se obtendría un espesor de 8,7cm y en el caso del árbol 6 un espesor de 9,7cm.



Gráfica N°9: Distribución de los mejores árboles por clase diamétrica

En la Gráfica N°10 se presentan los valores de longitud de fibra promedio por rango de distancia porcentual con respecto a la médula. Sabido es, que no es posible visualizar con nitidez los anillos de crecimiento en la especie estudiada, por lo que para facilitar la comparación de los datos entre árboles de diferentes diámetros, se expresan las distancias a la médula como porcentaje de distancia. El resultado obtenido del análisis de la distribución (desde médula a corteza) de cada uno de los árboles, demuestra que en el monte estudiado, la transición entre madera juvenil y adulta se da en un rango del 40 al 60% del radio. Dicha transición presenta una longitud de fibras entre 0,9 y 1,0 mm.



Gráfica N°10: Transición de madera juvenil a adulta

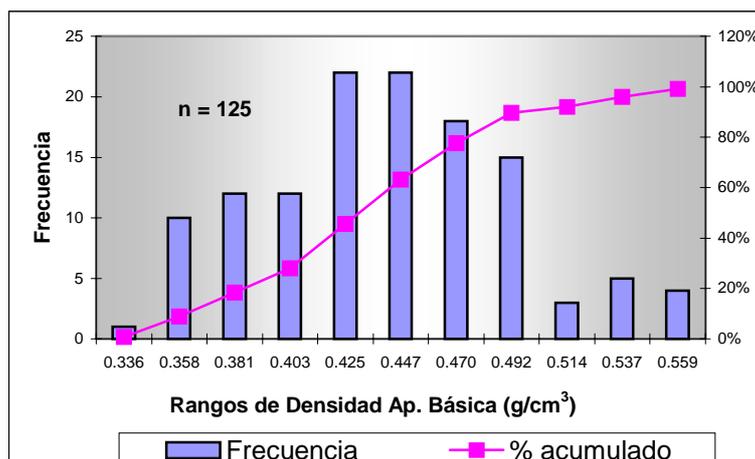
3.3.3. Resultados de longitud de fibra en madera juvenil y adulta: al poder determinar una zona de transición, se pueden obtener los promedios de longitud de fibra para las zonas de madera juvenil y adulta. En la Tabla N°5, se observan los promedios, desviación estándar y el coeficiente de variación de la totalidad de la muestra. Los valores son los esperados para esta especie, presentando la madera juvenil un valor promedio bajo y la madera adulta cercano a un milímetro. Es notable también la gran diferencia en el coeficiente de variación entre la madera adulta, siendo el de esta última remarcadamente más bajo. Esto último, puede ser utilizado para concluir que la madera adulta se presenta como una madera más homogénea, lo cual indica seguramente una mejor calidad en lo que refiere a las propiedades tanto físicas fundamentales como mecánicas.

Tabla N°5: Resultados de longitud de fibra para madera juvenil y adulta.

	Madera juvenil	Madera adulta
Promedio (mm)	0,78	1,05
Desv. Est.	0,14	0,09
C.V. (%)	18,01	8,86

3.4. DENSIDAD APARENTE BÁSICA (D_{ab}):

La densidad aparente o peso específico aparente es una propiedad muy importante, debido a su estrecha relación con la resistencia mecánica de la madera, así como su muy buena correlación con otros indicadores de calidad. Inicialmente, se estudian los resultados obtenidos como una gran masa de datos, sin hacer distinciones entre posiciones en el radio y el árbol del que provienen. Es posible determinar en el histograma (Gráfica N°11) que el rango de D_{ab} varía aproximadamente desde 0,34 a 0,56 g/cm^3 , con un promedio de 0,43 g/cm^3 . Se puede apreciar también que el 75% de los datos se acumulan en un rango más reducido (entre 0,38 y 0,49 g/cm^3).



Gráfica N°11: Histograma de la totalidad de probetas estudiadas.

Las probetas obtenidas desde médula a corteza para cada árbol, se han numerado del 1 al 5, siendo la N°1 cercana a la médula y la N°5 cercana a la corteza (albura). De esta manera se podrán comparar los resultados entre árboles y por posición en el radio.

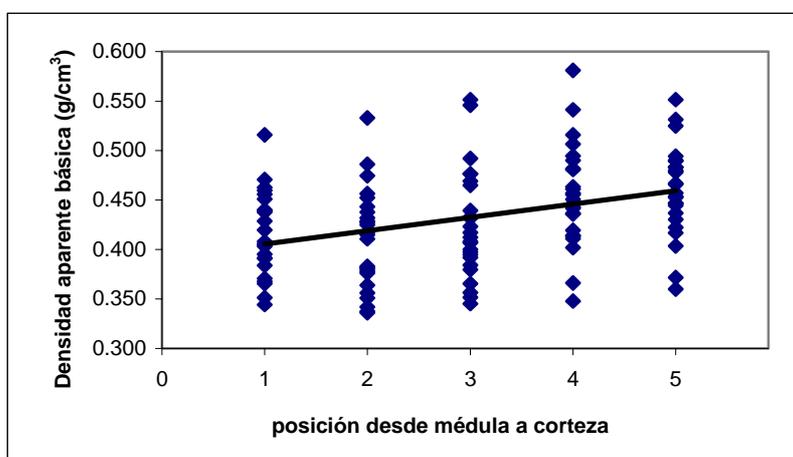
3.4.1. Comparación entre árboles y relación con la velocidad de crecimiento: Para comparar los valores de D_{ab} entre árboles, se determina un valor promedio característico de cada árbol. Este valor se obtiene de promediar las probetas desde médula a corteza. En la Tabla N°6 se presentan los valores promedio para cada árbol, observándose un rango de 0,35 a 0,52 g/cm^3 . Este rango determina un coeficiente de variación elevado ($C.V.=12\%$), que significa una variación realmente grande entre árboles dado que se trata de un muestreo obtenido en una misma parcela. De la misma forma se observan valores para la madera juvenil y adulta, observándose que los valores obtenidos para madera adulta son, promedialmente, un 9% mayores que para la madera juvenil.

Se estudió la relación entre la densidad aparente básica y la velocidad de crecimiento, relacionando los diámetros a la altura de pecho con los valores promedio de D_{ab} . Se puede concluir que no existe en este caso, ninguna relación entre estos dos parámetros, dado el bajo coeficiente de correlación encontrado ($r \approx 0,1$).

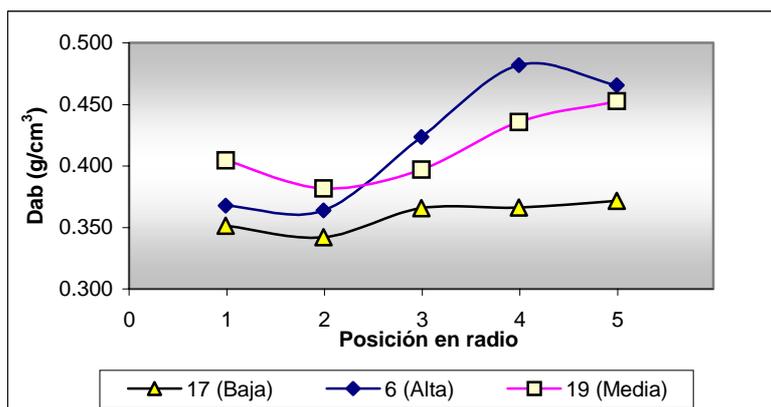
Tabla N°6: D_{ab} promedios, madera juvenil y adulta

N° deTroza	D_{ab} (g/cm ³)		
	Promedio	Madera juvenil	Madera adulta
17	0,354	0,349	0,361
11	0,381	0,364	0,407
14	0,399	0,367	0,446
10	0,407	0,390	0,433
21	0,408	0,405	0,412
19	0,410	0,391	0,440
1	0,415	0,396	0,444
6	0,416	0,393	0,450
13	0,426	0,403	0,461
12	0,437	0,418	0,466
3	0,443	0,423	0,472
4	0,457	0,448	0,471
18	0,460	0,450	0,475
5	0,491	0,480	0,509
20	0,518	0,504	0,540
Promedio total	0,432	0,412	0,453
Desv.Est total	0,052	0,043	0,042
C.V. (%)	12,1	10,4	9,3

3.4.2. Distribución de D_{ab} en el radio: Se estudia la distribución de la densidad aparente básica en el sentido radial, mediante la medición de cinco probetas desde médula a corteza. Se debe tener en cuenta que cada probeta contiene al menos tres anillos de crecimiento, estudiando de esta manera la totalidad de madera del listón radial en cada árbol. En la Gráfica N°12 se muestran los datos obtenidos para todos los árboles, clasificando por posición en el radio desde médula a corteza. Es notoria la gran dispersión que existe en cada posición, observándose rangos similares para todas ellas. Ahora bien, al estudiar las distribuciones de cada árbol por separado, se encuentran distribuciones similares, no en cuanto a los valores, sino que en cuanto a la forma. Esto dado que en todos los casos, la densidad cercana a la médula muestra valores de D_{ab} menores a las cercanas a la corteza.



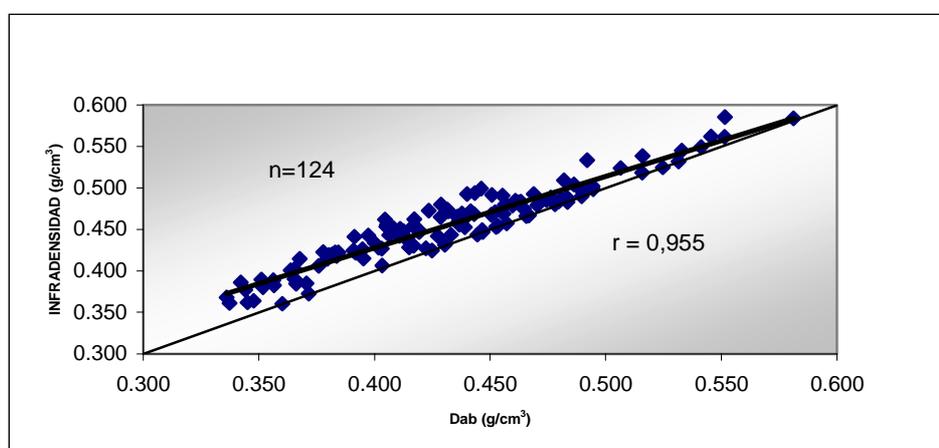
Gráfica N°12: D_{ab} por posición en el radio.



Gráfica N°13: Distribución de D_{ab} en el radio (3 ejemplos).

En la Gráfica N°13 se muestran tres ejemplos de distribuciones correspondientes a los árboles 17, 6 y 19 de clases diamétricas diferentes. Siguiendo cada distribución por separado, por ejemplo la del árbol 19, que presenta un valor de D_{ab} medio se observa un leve descenso hacia el centro del radio (posiciones 2 y 3) y un ascenso marcado hacia la corteza (posiciones 4 y 5 posiblemente madera adulta). En el árbol 6, las posiciones 1 y 2 forman una meseta produciéndose luego un ascenso pronunciado hacia la 4 y 5. Por último, el 17 presenta valores de D_{ab} más bajos (próximos a $0,36g/cm^3$) y aunque no se observa una variación pronunciada, se puede señalar que la distribución es similar a las anteriores. Habiendo estudiado todas las probetas individualmente, se puede concluir que no es posible determinar distintos patrones de comportamiento o distribución de D_{ab} desde médula a corteza. Sin embargo, si es posible reconocer que en todos los casos sucede que las tres primeras posiciones (posición 1, 2 y 3), presentan una D_{ab} menor que las últimas dos (posición 4 y 5). Se podría argumentar, que este comportamiento se puede deber a que las posiciones iniciales 1 y 2 están constituidas de madera juvenil, que la intermedia (posición 3) seguramente pertenezca a una zona de transición entre madera juvenil y adulta y por último que las posiciones cercanas a la corteza están compuestas por madera adulta.

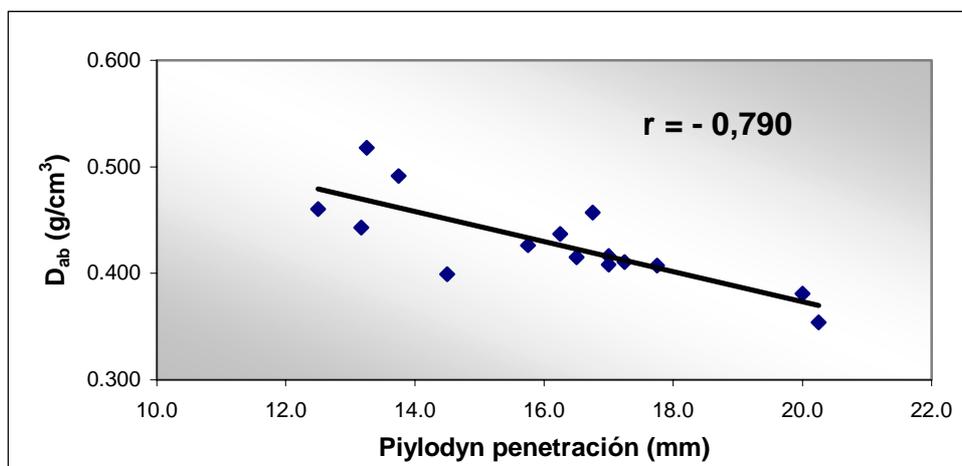
3.4.3. Determinación de D_{ab} por infradensidad: Como se presenta en 2.2.3., se determina la densidad por dos métodos directos (inmersión en agua e infradensidad). En la Gráfica N°14 se comparan ambos métodos, observando una correlación alta ($r=0,955$) y constatando que los valores de infradensidad se podrían considerar mayores que los obtenidos con el método por inmersión en agua.



Gráfica N°14: Densidad aparente básica vs. infradensidad.

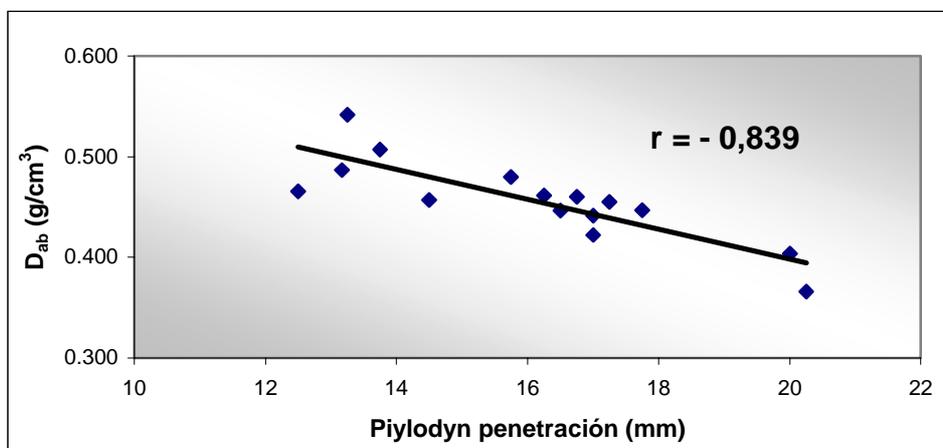
Se puede decir que los valores de infradensidad serán 6,9% mayores para madera juvenil y 2,8% mayores para madera adulta. La determinación de la D_{ab} mediante el método de infradensidad es más sencilla, por lo que este resultado puede significar una simplificación importante.

3.4.4. Estimación de D_{ab} con penetración Pilodyn: Se quiere estudiar método indirecto para poder estimar valores de D_{ab} en árboles en pie. Para ello, se utiliza el método de penetración Pilodyn, método muy sencillo y aplicable en el monte. Para observar la posibilidad de utilizar el Pilodyn como método alternativo, se lo relaciona con el promedio de D_{ab} (desde médula a corteza). Esta relación, se observa en la Gráfica N°15 obteniendo una correlación del orden de $r=0,79$. Como el Pilodyn se aplica en la zona más cercana a la corteza, es de esperar una correlación mayor con las probetas N°5. En efecto, los puntos relacionados se aproximan aún más a la tendencia lineal con un índice de correlación $r=0,84$ (ver Gráfica N°16).



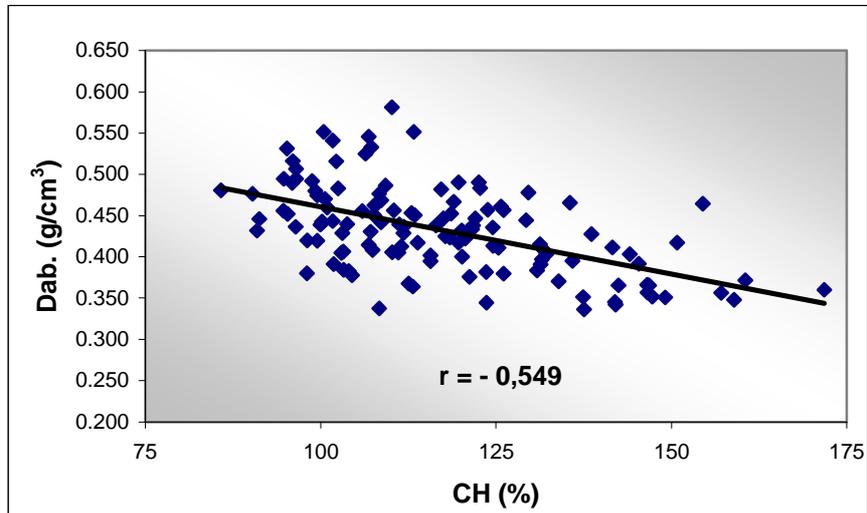
Gráfica N°15: D_{ab} promedio (desde médula a corteza) vs. penetración Pilodyn.

Ahora bien, no es posible determinar una relación definitiva entre D_{ab} y penetración Pilodyn, pues se está estudiando una cantidad reducida de trozas. Sin embargo, una vez más se verifica al Pilodyn como una herramienta muy útil para la clasificación de árboles en pie, donde a menor penetración mayor será la D_{ab} .



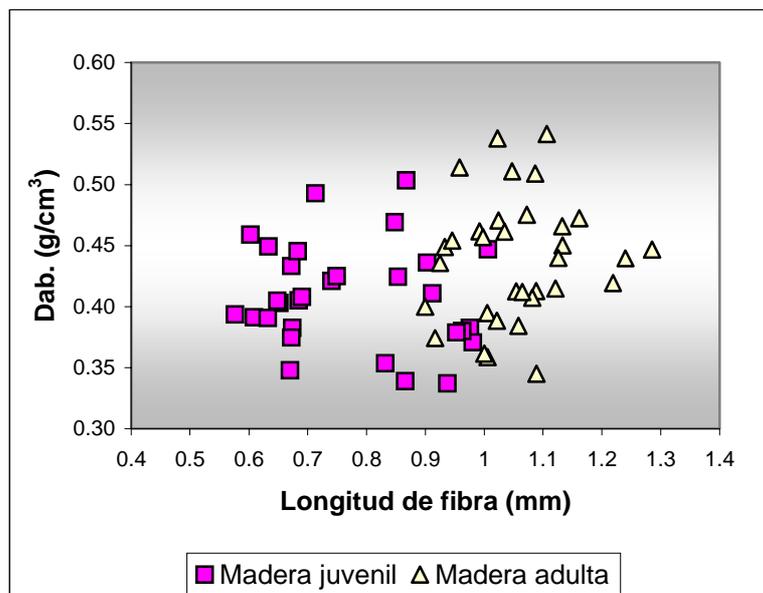
Gráfica N°16: D_{ab} cercano a corteza (probeta N°5) vs. Penetración de Pilodyn.

3.4.5. Relación con el Contenido de humedad: Es posible relacionar la D_{ab} . con otros indicadores de calidad de madera como el contenido de humedad. En este caso, en la Gráfica N°17 se observa que en dicha relación aunque no tiene una correlación lineal muy marcada, se podría afirmar que a menor CH mayor D_{ab} .

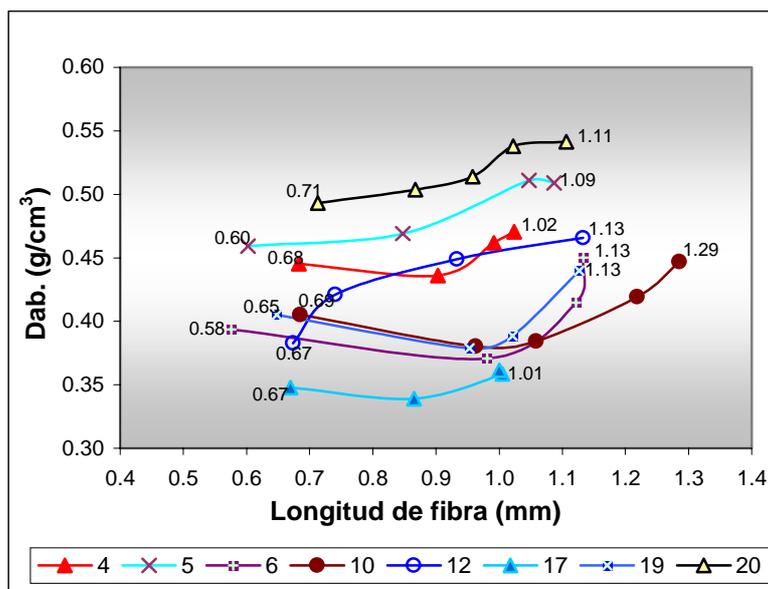


Gráfica N°17: D_{ab} . vs. contenido de humedad en estado verde.

3.4.6. Relación con la longitud de fibra: Al buscar alguna relación general de la densidad aparente básica con la longitud de fibras, se encuentran correlaciones bajas encontrándose una gran dispersión de datos (ver Gráfica N°18). Sucede lo mismo, si separamos los datos obtenidos para madera juvenil y adulta. No obstante, al distinguir por separado las distribuciones de cada árbol, en la Gráfica N°19, se puede ver que la gran dispersión proviene de los datos de D_{ab} y principalmente de la variación entre árboles, mientras que la longitud de fibras no presenta variaciones tan pronunciadas. La longitud de fibra cercana a la médula presenta valores cercanos a los 0,6mm mientras que los cercanos a la corteza serán de aproximadamente 1,1mm.



Gráfica N°18: Relación entre D_{ab} . y Long. de fibra en madera juvenil y adulta



Gráfica N°19: Relación entre $D_{ab.}$ y Long de fibra por árbol.

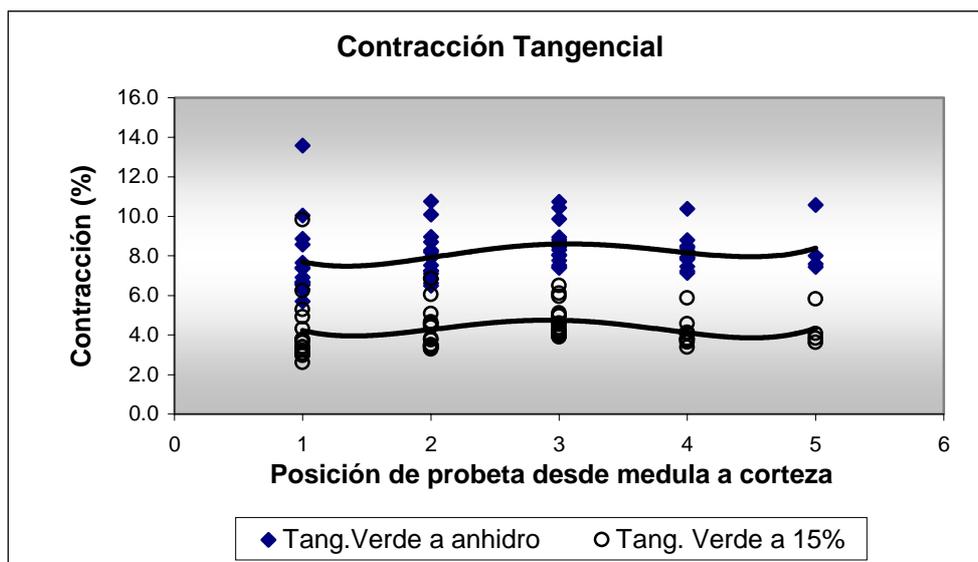
3.5. CONTRACCIÓN TANGENCIAL, RADIAL Y VOLUMÉTRICA

Como se expresó anteriormente, la contracción de la madera comienza a producirse cuando su contenido de humedad baja del punto de saturación de las fibras (PSF), que en esta especie según bibliografía se da aproximadamente a los 30%. Teóricamente, se puede considerar que por debajo de este punto, la contracción aumenta linealmente. Por esta razón, se toman tres puntos por debajo del PSF obteniéndose la recta que caracteriza la contracción. En este estudio se realizaron medidas de dimensiones a diferentes contenidos de humedad 18%, 15% y estado anhidro. En la Tabla N°7 se detallan los promedios totales de contracción obtenidos.

Tabla N°7: Contracciones promedio.

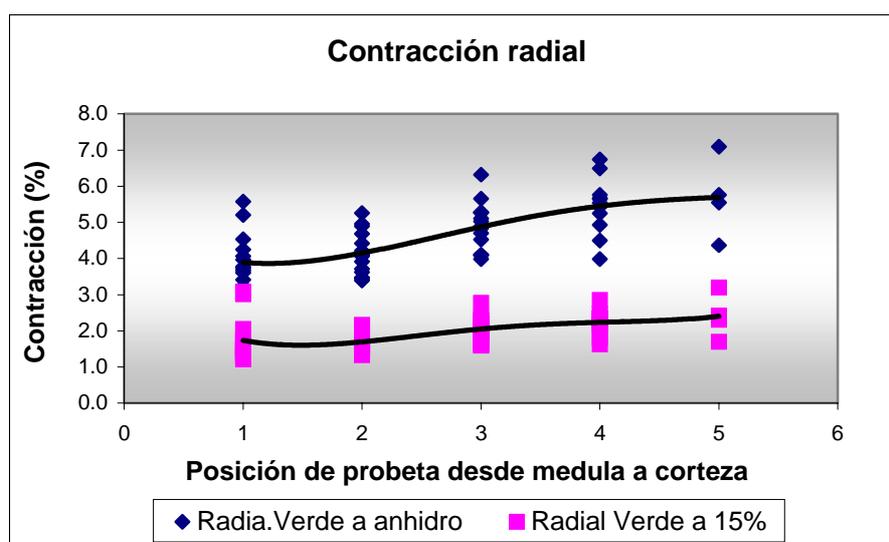
CH	Contracción (%)		
	tangencial	radial	volumétrica
Verde a 18%	3,6	1,41	5,01
Verde a 15%	4,35	1,94	6,29
Verde a anhidro	8,11	4,61	12,72

3.5.1. Contracción tangencial y radial desde médula a corteza: Se estudia seguidamente, las tendencias de contracción desde médula a corteza en las distintas direcciones. Por ejemplo, en la Gráfica N°20 se observan las distribuciones de contracción tangencial desde condición verde hasta 15 y 0 %. En este caso se toman todas las probetas analizadas diferenciándolas por posición en la médula. La tendencia es estable, no observándose una variación importante en los valores promedio desde médula a corteza.



Gráfica N°20: Contracción tangencial en probetas desde médula a corteza.

De la misma forma, se presenta la Gráfica N°21 en la cual se observa la contracción radial desde médula a corteza para las mismas condiciones. Es notoria la tendencia a aumentar los valores de contracción a medida que se llega a probetas cercanas a la corteza.



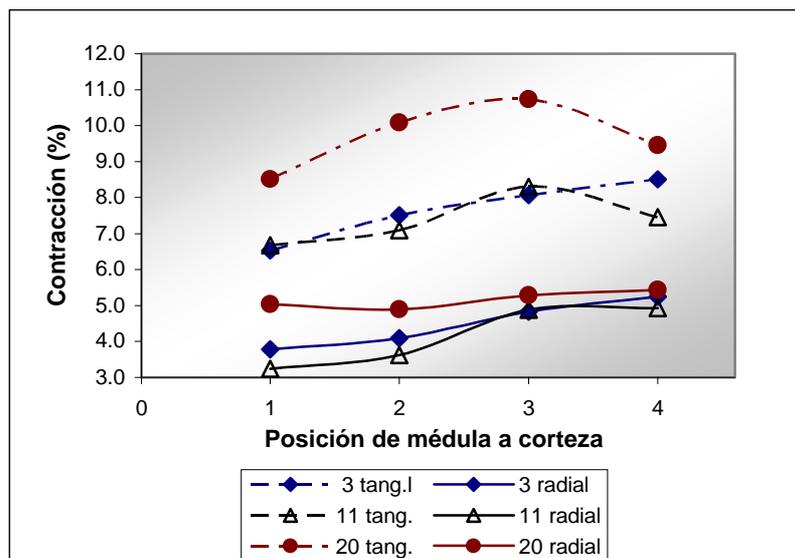
Gráfica N°21: Contracción radial en probetas desde médula a corteza.

Es interesante observar en ambas Gráficas N°20 y N°21 la dispersión existente en los resultados de contracción obtenidos en cada posición, lo que denota una posible diferencia entre árboles. Los resultados por árbol se pueden observar en la Tabla N°8 donde se ordena por valores crecientes de contracción volumétrica. En dicha tabla, se separan los árboles en tres clases con contracciones bajas, medias y altas. La clase baja presenta 6 árboles con contracciones volumétricas de entre 11 y 12 %.

Tabla N°8: Contracción tangencial, radial y volumétrica promedio desde condición verde a anhidro

N° de árbol	Contracción desde verde a anhidro(%)		
	tangencial	radial	volumétrica
14	7,25	3,90	11,15
4	7,19	4,35	11,54
11	7,38	4,17	11,55
10	7,25	4,40	11,65
6	7,49	4,38	11,87
17	7,55	4,43	11,97
18	8,07	3,93	12,00
1	7,10	4,99	12,09
3	7,65	4,48	12,14
19	7,71	4,57	12,27
12	8,38	4,45	12,83
5	8,52	5,15	13,67
21	10,22	4,65	14,87
13	9,50	5,83	15,32
20	10,70	5,30	16,00
Promedio	8,13	4,60	12,73
Desv. Est.	1,14	0,52	1,52
C. V. (%)	14,0	11,3	11,9

En la clase media se encuentran 5 árboles en un rango de 12 a 13% de contracción volumétrica. O sea que en un rango de entre 11 y 13 % se encuentra el 73% de los árboles estudiados mientras que el 27% restante presenta las mayores contracciones. Se destaca en este caso el árbol N°20 con la mayor contracción volumétrica promedio desde verde a anhidro de un 16%. En la misma tabla se observan los coeficientes de variación (C.V.) de los valores promedio obtenidos de un 14% para la contracción tangencial y 11% para la radial. Al poder realizar una clasificación de los árboles, es posible tener en cuenta esta propiedad para la elección de árboles plus con fines de mejoramiento genético.



Gráfica N°22: Contracción tangencial y radial para árboles N°3, 11 y 20.

En la Gráfica N°22 se muestran las distribuciones desde médula a corteza de la contracción tangencial y radial para un árbol por clase, encontrándose el árbol N°11 para contracciones bajas, árbol N°3 para contracciones medias y el árbol N°20 para contracciones altas.

Estudiando la distribución desde médula a corteza, todos los árboles presentaron la misma tendencia, como se ha comentado anteriormente, las probetas de madera juvenil presentan contracciones menores a las que están compuestas de madera adulta.

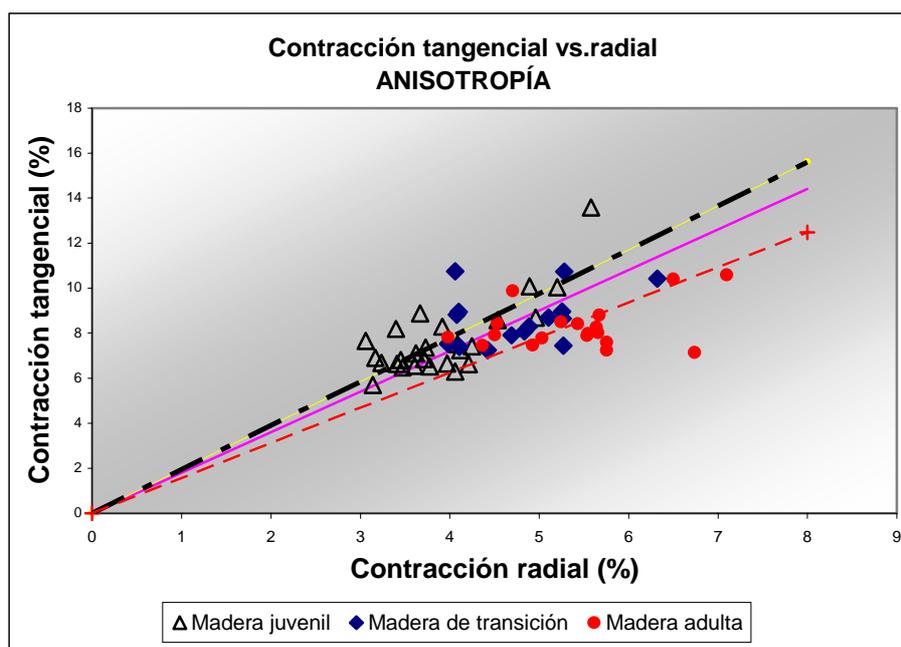
3.5.2. Anisotropía o relación entre contracción tangencial y radial (β_t/β_r): La anisotropía es la relación entre la contracción tangencial y radial en las mismas condiciones de contenido de humedad. Al estudiar un material como la madera, la idea de anisotropía es muy importante dada la posible deformación al someterla a un proceso de secado. El valor ideal del coeficiente anisotrópico, sería 1 (uno) lo que determinaría una alteración idéntica para las dimensiones radial y tangencial. Cuanto mayor es dicho coeficiente, más dificultades se pueden encontrar durante el secado. En bibliografía se encuentra una clasificación de la calidad de las maderas según su comportamiento anisotrópico (CORONEL, E., 1994):

- ❖ $1,2 < \beta_t/\beta_r < 1,5$ maderas consideradas excelentes.
- ❖ $1,6 < \beta_t/\beta_r < 1,9$ madera considerada normal.
- ❖ $\beta_t/\beta_r > 2,0$ madera con menor posibilidad de utilización.

En la Tabla N°9 se presentan los valores de coeficiente anisotrópico encontrados para el *Eucaliptus grandis* en la cual se hace una diferenciación entre madera juvenil, de transición y adulta.

Tabla N°9: Relación β_t/β_r para madera juvenil, de transición y adulta.

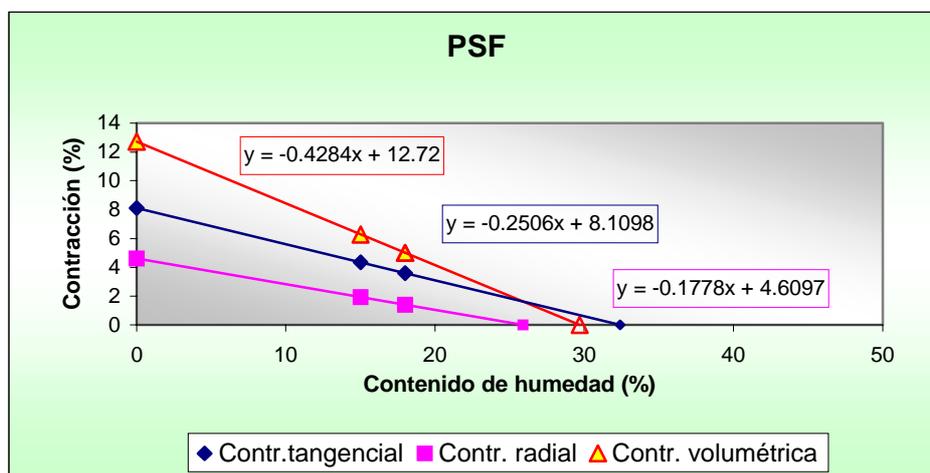
	Total	Madera juvenil	Madera de transición	Madera adulta
β_t (%)	8,11	7,66	8,66	8,29
β_r (%)	4,61	3,93	4,78	5,40
β_t/β_r	1,80	1,95	1,83	1,56



Gráfica N°23: Anisotropía o relación entre contracción tangencial y radial.

La madera adulta presenta una anisotropía promedio de 1,56 lo que significa, según la clasificación antes mencionada, que es una muy buena madera con posibilidad de utilización multipropósito. Sin embargo, los valores hallados para la madera de transición y juvenil comienzan a bajar la calidad obteniendo valores de relación anisotrópica mayores entre 1,8 y 1,9 pertenecientes al extremo superior de la clasificación media. Otra forma de visualizar esta diferencia, se presenta en la Gráfica N°23 donde se representa la relación entre la contracción tangencial y radial, donde la pendiente de las líneas de tendencia es la anisotropía. Se observan tres líneas de tendencia, la pendiente mayor corresponde a la madera juvenil, la media a la madera de transición y la menor a la madera adulta.

3.5.3. Punto de saturación de las fibras (PSF) y coeficiente de contracción: Las rectas teóricas obtenidas permiten determinar el punto de saturación de las fibras, pues como se ha explicado anteriormente, el PSF es teóricamente el contenido de humedad en el cual se comienza a observar contracción.



Gráfica N°24: Determinación del punto de saturación de las fibras (PSF).

Se toma entonces como PSF, al punto donde cada recta intercepta al eje de CH. En la Tabla N°9 se muestran los PSF obtenidos para cada recta. Teóricamente las rectas se tendrían que interceptar en el mismo contenido de humedad, sin embargo en este caso se tiene que informar un rango entre 26 y 32 % de humedad en el cual se debe considerar el Punto de Saturación de las Fibras de la madera estudiada. Las ecuaciones de las rectas teóricas obtenidas para la contracción tangencial, radial y volumétrica permiten estimar la contracción desde la condición verde hasta cualquier contenido de humedad por debajo del PSF.

Tabla N°9: Rectas teóricas de contracción, PSF y Coeficiente de contracción.

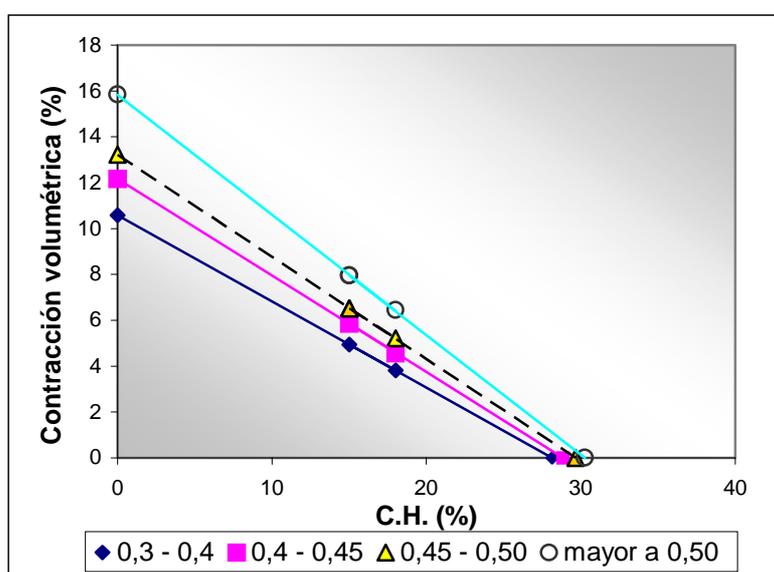
Contracción	%Contracción = a * %humedad + b	PSF (%)	Coef. de contracción (%β / %CH)
volumétrica	$y = -0.43x + 12.72$	29.7	0.43
tangencial	$y = -0.25x + 8.11$	32.4	0.25
radial	$y = -0.18x + 4.61$	25.9	0.18

También de dichas rectas se puede obtener el “Coeficiente de contracción” el cual es un valor muy importante, dado que representa la contracción producida al bajar 1% en contenido de humedad de la madera, siempre por debajo del PSF. Éste coeficiente será útil para calcular la contracción teórica ($\Delta\beta$) al variar un determinado rango de %CH (ΔCH). La fórmula utilizada será la siguiente:

$$\Delta\beta = \Delta CH * \text{Coef. de contracción}$$

Por ejemplo, si la madera tiene un 28% de CH, para saber cuál será la contracción volumétrica al secarla hasta 10% ($\Delta\beta = 18\%$ de CH) se calcula con el coeficiente de contracción volumétrico (0,43) de la siguiente manera: $18 * 0,43 = 7,74\% \beta_v$.

Tomando en cuenta solamente la contracción volumétrica, se realiza un estudio del comportamiento del punto de saturación de las fibras al variar la $D_{ab.}$ de la madera. En la Gráfica N°25 se representa el cambio en la recta observando que a rangos mayores de $D_{ab.}$ aumenta la contracción volumétrica.



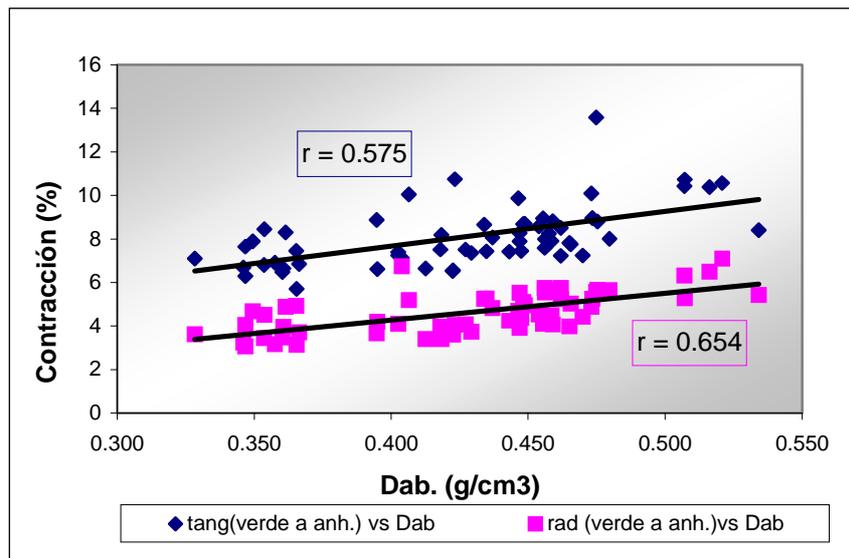
Gráfica N°25: PSF para distintos rangos de densidad aparente básica.

La misma tendencia se obtiene para el PSF donde: a mayor rango de $D_{ab.}$ mayor será el punto de saturación de las fibras. Se presenta en la Tabla N°10 los PSF obtenidos para cada rango de $D_{ab.}$

Tabla N°10: Punto de saturación de las fibras por rango de $D_{ab.}$ obtenido en contracción volumétrica.

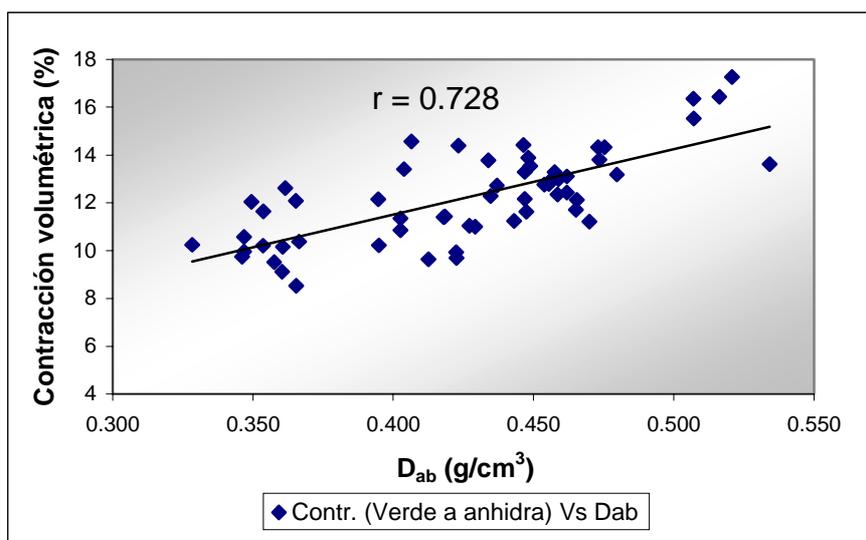
Rango de $D_{ab.}$ (g/cm^3)	PSF (%)
0,30 - 0,40	28,2
0,40 - 0,45	28,9
0,45 - 0,50	29,7
mayores a 0,50	30,3

3.5.4. Relación con otras propiedades físicas fundamentales: Se intenta buscar una relación entre la contracción y otras propiedades fundamentales como la densidad aparente básica y la longitud de las fibras. Al ser la madera un material anisotrópico, es de esperar mejores correlaciones con la contracción volumétrica (suma de tangencial y radial). La relación entre la contracción y la densidad aparente básica, se puede observar en las Gráficas N°26 y N°27. En la primera gráfica se relaciona la contracción tangencial y radial con la D_{ab} determinando valores de coeficiente de correlación positivos de $r=0,6$ para la contracción tangencial y de $r=0,7$ para la contracción radial.



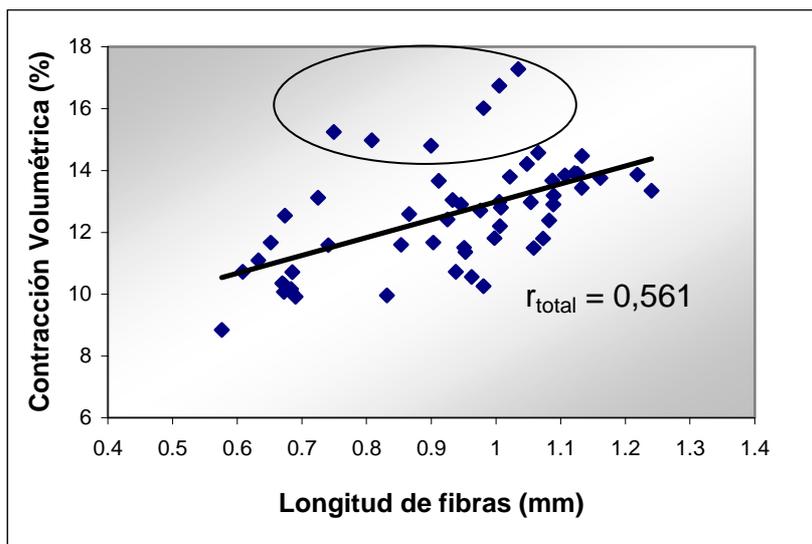
Gráfica N°26: Relación entre la contracción tangencial y radial y la D_{ab} .

En la segunda se relaciona la contracción volumétrica con la D_{ab} encontrándose un coeficiente de correlación de 0,73. En conclusión a mayor densidad aparente básica, mayor será la contracción tangencial, radial y por consiguiente la volumétrica.



Gráfica N°27: Relación entre contracción volumétrica y la D_{ab} .

De la misma forma, se estudia la relación entre la contracción volumétrica y la longitud de fibras. En la Gráfica N°28 se observa la tendencia positiva entre estos dos parámetros presentando un coeficiente de correlación $r_{\text{total}} = 0,56$ tomando en cuenta la totalidad de los datos obtenidos. Sin embargo, se indica con un círculo la inclusión de algunos puntos en los cuales la contracción volumétrica es notoriamente superior a la media. Estudiando cada uno de estos puntos por separado, se observa un alto valor de contracción tanto tangencial como radial, que lleva a suponer para estos casos la ocurrencia del fenómeno de colapso. Si se toma en cuenta esta posibilidad, se descartan los puntos afectados y se recalcula el coeficiente de correlación, se obtiene un mejor ajuste a la linealidad de la relación estudiada ($r' = 0,74$). De esta forma, se puede concluir que a mayor longitud de fibras, mayor será la contracción volumétrica.



Gráfica N°28: Relación entre la contracción volumétrica y la longitud de fibras.

3.6. COMPARACIÓN CON OTRAS ESPECIES COMERCIALES

En este punto se muestra la comparación en algunas de las propiedades estudiadas en este trabajo (*Eucalyptus grandis* del litoral) con otro monte similar proveniente del Norte del Uruguay y con otras especies de común comercialización como Cedro (*Cedrela spp.*), Teka (*Tectona grandis*), Meranti (*Shorea spp.*), Cerejeira (*Amburana cearensis*), *Eucalyptus tereticornis* y Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho -blanco*), cuyos valores se extrajeron de bibliografía relacionada (1)(2)(3)(4).

3.6.1. Densidad Aparente Básica: En la Figura N°7 se ve un cuadro comparativo entre las especies mencionadas anteriormente. Al observar este cuadro es importante tener en cuenta que los datos fueron obtenidos de bibliografía, en la cual generalmente se presentan valores de árboles en su mayoría provenientes de bosques nativos. Esto implica que las edades de estos árboles sean mayores que las de los *E. grandis* comparados, los cuales son provenientes de plantaciones sustentables jóvenes. Por este motivo, para realizar la mencionada comparación se toman en cuenta solamente los datos de madera adulta. En lo que refiere a la densidad aparente básica, se observa que los valores obtenidos para los dos *E. grandis* son similares (siendo mayor el Río Negro o litoral).

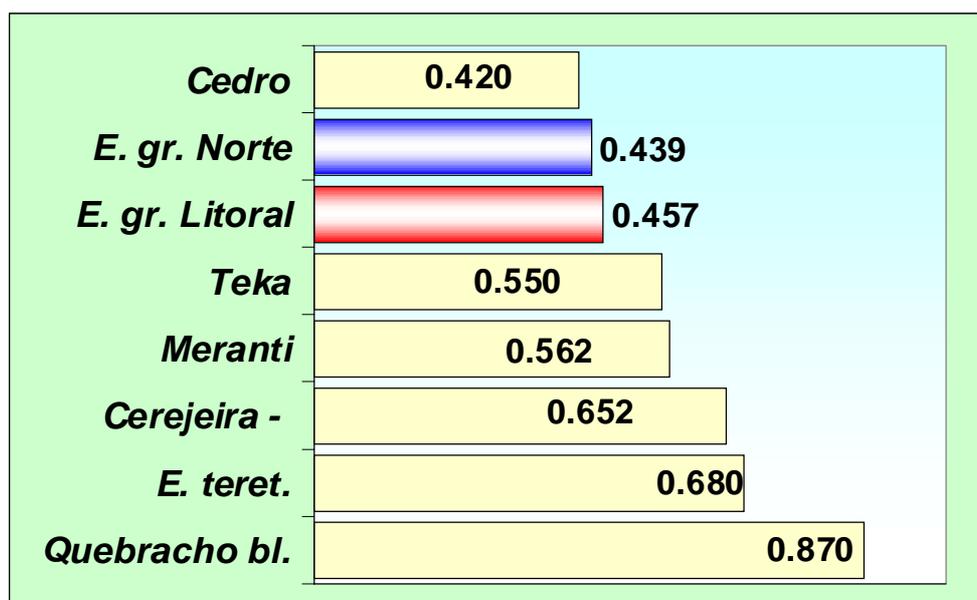


Figura N°7: Cuadro comparativo de D_{ab}. en (g/cm³)

Con respecto a las demás maderas, el *E. grandis* se compara satisfactoriamente con el Cedro, Teka y Meranti. Al tener en cuenta la edad de corte de las plantaciones estudiadas y la tendencia a aumentar la D_{ab}, se puede esperar que con turnos de corte más largos, se podrá obtener madera de mayor calidad y densidad aparente.

3.6.2. Contracción volumétrica total y anisotropía: en cuanto a la contracción volumétrica, el *Eucalyptus grandis* del litoral (Río Negro) es menor a la del Norte. Se sitúa en una contracción media con respecto a las demás especies comparadas (ver Figura N°8).

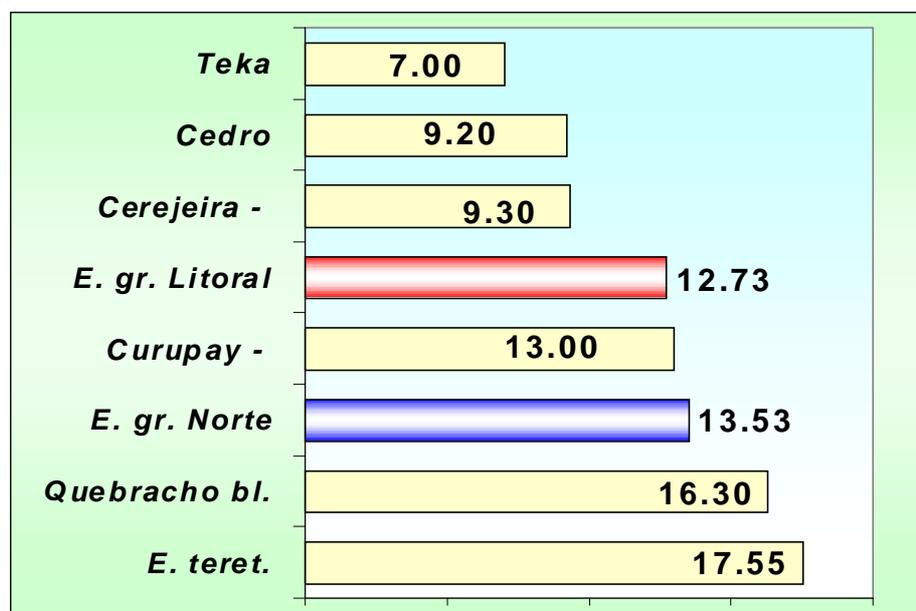


Figura N°8: Cuadro comparativo de contracción volumétrica total (%)

Es conveniente hacer alguna apreciación en cuanto a las características de contracción de algunas de las especies con las que se están comparando los *E. grandis*. Se debe observar que el Cedro, Teka y Cerejeira, aunque presentan contracciones muy bajas (entre 7,0% y 9,5% Figura N°8) mientras que en el caso de la anisotropía, sus valores son los más elevados (mayor a 2,0 Figura N°9).

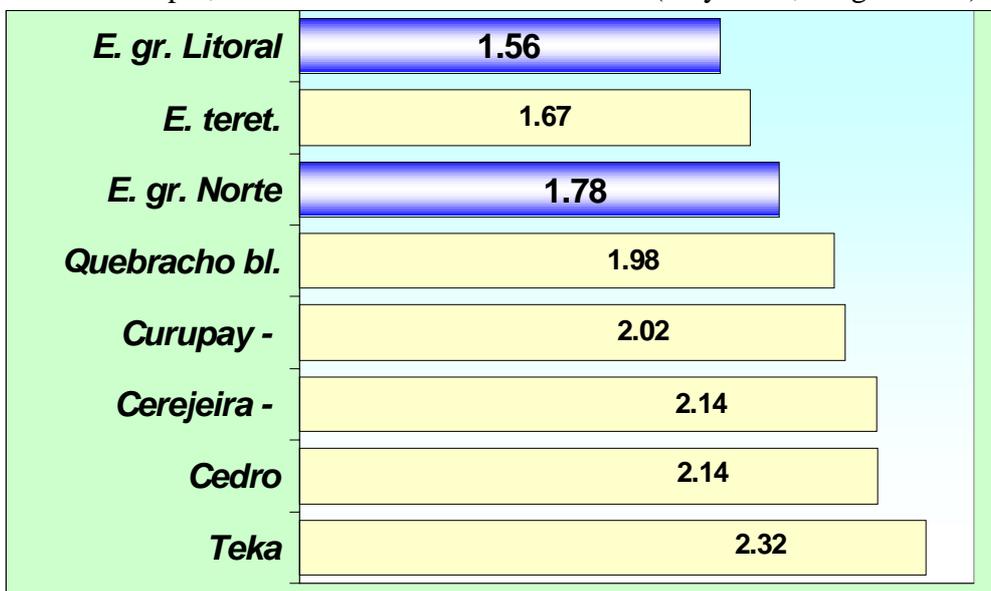


Figura N°9: Cuadro comparativo de anisotropía en madera adulta.

En el caso de la madera adulta de *E. grandis*, ésta demuestra ser una madera con baja anisotropía, presentando valores entre 1,5 y 1,8. Desde el punto de vista de la calidad de la madera, esto significa que está en condiciones de competir de muy buena forma con las especies antes mencionadas. Es aplicable también en este caso, el concepto del aumento de la calidad de madera adulta obtenida a medida que se prolongan los turnos de corte.

Por último, este cotejo del *E. grandis* con especies en su mayoría provenientes de bosques nativos, arroja un balance totalmente positivo y es aún más importante, pensando en que la tendencia a la utilización de madera proveniente de plantaciones sustentables es cada vez más marcada.

4. CONCLUSIONES

- 1) La clasificación visual de las trozas determina tres clases bien diferenciadas, donde un 67% de las trozas muestra una muy buena calidad, presentando poco combado y baja presencia de nudos. No obstante, no se encontró ninguna relación entre las diferentes clases y ninguno de los indicadores de calidad estudiados.
- 2) El porcentaje de duramen de *E. grandis* presenta un promedio de 62% en volumen, encontrándose un mínimo de 49% y un máximo de 75%. No se observa ninguna relación entre el porcentaje de duramen y la velocidad de crecimiento.
- 3) El estudio de la longitud de las fibras desde médula a corteza, define que la transición entre madera juvenil y adulta a la altura de pecho, se encuentra en un rango del 40 al 60% del radio. Dicha transición presenta una longitud de fibras entre 0,9 y 1,0 mm, mientras que las probetas cercanas a la médula presentan promedios de aproximadamente 0,65 mm y las cercanas a la corteza 1,1 mm.
- 4) La densidad aparente básica, uno de los indicadores de madera más importantes, presenta una gran variación entre árboles y dentro de cada uno de ellos (sentido radial). El rango de D_{ab} varía aproximadamente desde 0,34 a 0,56 g/cm³, con un promedio de 0,41 g/cm³ para la madera juvenil y de 0,45g/cm³ para la adulta.
- 5) El método de determinación de D_{ab} por inmersión presenta una muy buena correlación ($r=0,95$) con las determinaciones por el método de Infradensidad, constatándose que los valores de Infradensidad se podrían considerar promedialmente un 6,9% mayores para madera juvenil y 2,8% mayores para madera adulta. No es posible determinar una relación definitiva entre D_{ab} y penetración Pilodyn, pues se han estudiado una cantidad reducida de trozas. Sin embargo, se verifica el Pilodyn como una herramienta muy útil para la clasificación de árboles en pie, donde a menor penetración mayor D_{ab} .
- 6) La contracción total promedio tangencial y radial (desde condición verde a anhidro) fue de 8,1 y 4,6% respectivamente, determinando por lo tanto una contracción volumétrica total de 12,7%. Para la anisotropía o relación entre β_t/β_r se encontraron diferencias significativas entre los resultados obtenidos para madera juvenil, de transición y adulta, lo cual puede significar una diversidad en cuanto a los posibles usos finales de la madera estudiada.
- 7) Al cotejar algunos resultados obtenidos con otras especies que se comercializan en Uruguay, el balance es totalmente positivo. Desde el punto de vista de la calidad de la madera, se concluye que la madera adulta de *E. grandis* está en condiciones de competir de muy buena manera, siendo posible un incremento en su calidad al aumentar los turnos de corte.
- 8) El estudio de las propiedades fundamentales de la madera es de suma importancia, tanto para asegurar un adecuado uso final, como para generar una base de datos útil para la comercialización de la misma. En este sentido es imprescindible la continuidad de los trabajos de investigación en un mayor número de sitios dentro del territorio nacional.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. AGRICULTURE HANDBOOK 72/ *Wood Handbook*, Wood as an Engineering Material, USDA, 1999.
2. WOOD ENGINEERING HANDBOOK/ *Wood Engineering Handbook*, Forest Product Laboratory, 2nd Ed., 1990.
3. KOLLMANN, F; CÔTE, W./ *Principles of Wood Science and Technology*, Volume I; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1968.
4. CORONEL, E./ *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*, 1ra. Parte, Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.
5. TUSET, R; DURAN, F./ *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*, 1986. Editorial Hemisferio Sur.
6. BÖTHIG, S./ *Densidad, Dureza y Color de Eucalyptus grandis de Uruguay*, Informe de Investigación N°5; LATU-JICA 2001.
7. PEREZ DEL CASTILLO, A./ *Propiedades mecánicas y calidad de madera de Eucalyptus grandis*, Informe de Investigación N°4; LATU-JICA 2001.
8. STAMM, A. J., *Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products*, Wood Science Vol.4 N°2, 1971.

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