



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES**

**Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales**

**Facultad de Ciencias Forestales**

**INFLUENCIA DEL RALEO SOBRE LAS  
CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS Y LAS  
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA  
MADERA DE *Pinus taeda* L. DE LA REGIÓN NE DE LA  
ARGENTINA**

**ROSA ANGELA WINCK**

Tesis presentada a la Universidad Nacional de  
Misiones como exigencia parcial de la Maestría  
en Ciencias de la Madera Celulosa y Papel,  
Orientación en Tecnología de la Madera

**Directora:** Dra. María Cristina Area

**Co Directora:** Ms. Cs. Teresa María Suirezs

**Octubre 2013**

## DEDICATORIA

A mis hijos Maximiliano y Luana, a mi esposo Ramón y mis padres Nadir y Nelseu, quienes son los pilares más importantes de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas personas e instituciones que contribuyeron directamente e indirectamente para que este proyecto se concrete, a ellos mis más sinceros reconocimientos.

Al INTA por brindarme la posibilidad de formarme profesionalmente y por financiar este estudio a través de Becas de Formación de Postgrados.

Al Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Componente Plantaciones Forestales por el financiamiento brindado a través del Proyecto de Investigación Aplicada N° 10003.

A mi director de Beca, Hugo Enrique Fassola, quien desde un principio me guio y contribuyó significativamente a mi formación académica día a día, con ideas constructivas y superadoras, a quien le agradezco por su constante incentivo, por su competencia y energía que lo caracteriza.

A mi directora de tesis, María Cristina Area, por su intensa y valiosa participación en todos los momentos que necesité, por las rápidas y contundentes respuestas ante una consulta. Por facilitarme todos los medios necesarios para capacitarme en “Técnicas de determinación de Angulo Microfibrilar de la Madera” parte fundamental de la tesis.

Al profesor Mario Tomazello Filho por recibirme en vuestra universidad con tanta predisposición y amabilidad, además por brindarme todo el apoyo durante mi estadía en su institución y contribuir en mi formación académica, y en los temas relacionados a esta tesis.

A mi codirectora de tesis, Teresa María Suirezs por el acompañamiento en las actividades desarrolladas en el laboratorio de tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales.

Al profesor Daniel Videla por su apoyo y acompañamiento en los trabajos de campo.

A mi compañera de trabajo Sara Barth, por el constante apoyo durante todo el desarrollo de la tesis, por su gran aporte y sugerencias.

A María Elena Gauchat por guiarme durante el análisis de datos.

A mis compañeros del grupo forestal Ernesto Crechi, Aldo Keller, por el incentivo y constante apoyo.

A la Empresa APSA S.A. que facilitó el sitio donde oportunamente se instaló el ensayo de raleo, y de donde se obtuvieron las muestras para este estudio.

A la Empresa PINDO S.A. que realizó el aserrado y secado de la madera sin costo alguno, y además facilitó sus instalaciones para realizar la clasificación de la madera.

A los técnicos de INTA, Otto Knebel, Lucas Giménez y principalmente a Diego Aquino, por colaborar en las tareas de laboratorio.

A mis compañeros de la Maestría, por las charlas, por el compañerismo a lo largo del desarrollo de los cursos y por los momentos compartidos, en especial a Julieta Benitez.

A María Angélica Aguilera y Alicia Bohren, por colaborar en la preparación de los macerados.

A los docentes de la Maestría de la Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales de Posadas y a los docentes de la Facultad de Ciencias Forestales de Eldorado, mi agradecimiento, por los conocimientos y experiencias transmitidas durante mi formación académica.

Y mis más cálido cariño y agradecimiento a mi gran FAMILIA, en especial a mi esposo RAMÓN y a mis hijos MAXIMILIANO y LUANA, por la paciencia y por el apoyo incondicional durante todo el desarrollo de este proyecto de formación.

A DIOS, mi eterna gratitud por permitir un logro más en mi vida.

## RESUMEN

La región NE de la Argentina se caracteriza por el cultivo de especies forestales de rápido crecimiento con la finalidad de atender a los diferentes mercados de madera. El *Pinus taeda* constituye una de las especies de mayor importancia, debido a su alta tasa de crecimiento y a las características de la madera, que la hace apta para variados usos industriales. Se estima que la materia prima resultante de estas plantaciones podría presentar un alto porcentaje de leño juvenil, baja densidad, bajo valor de módulo de elasticidad, bajo módulo de rotura y alto valor de ángulo microfibrilar, lo que influiría negativamente en las propiedades tecnológicas de la madera. Con el objeto de evaluar la influencia del tratamiento silvicultural de raleo sobre las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* de 20 años de edad proveniente de una plantación con densidad inicial de 1960 plantas/ha, sobre la que se aplicaron diferentes intensidades de raleo (0%, 50%, 75% y 87,5% de la densidad inicial). La plantación estaba ubicada en el Departamento Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. De esta plantación se tomaron muestras a 1,30 m de altura y a diferentes distancias radiales de un total de 24 árboles, con 6 ejemplares por cada tratamiento de raleo. Se realizaron las mediciones de las distintas variables y se alcanzaron los siguientes resultados, los valores de resistencia a la flexión, densidad básica de la troza y longitud de traqueidas fueron similares para los tratamientos de raleo de 0%, 50% y 75%. Mientras que para el tratamiento más fuerte, con 87,5% de raleo, estas propiedades fueron negativamente afectadas, a excepción de la longitud de traqueidas que fue mayor para este tratamiento. Los valores de resistencia a la compresión paralela a las fibras y la densidad básica a 1,30 m de altura, disminuyeron para intensidades de raleo iguales o mayores al 75%. El tratamiento sin raleo presentó mayor valor medio de contracción volumétrica (11%), debido a que las traqueidas presentaron mayor proporción de leño tardío y mayor espesor de pared. Los tratamientos con 0% y 50% de raleo favorecieron la obtención de mejores valores de espesor de pared y ángulo microfibrilar. Las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas mejoraron

sustancialmente en la dirección que va desde la médula hacia la corteza, independientemente de la intensidad de raleo. Se concluye que con 50% de raleo se logró optimizar todas las propiedades de la madera evaluadas en este trabajo, que con un raleo igual a 75% algunas propiedades fueron afectadas, y que con raleo de 87,5% todas las propiedades sufrieron cambios significativos. Se determinaron asociaciones moderadas para el ángulo microfibrilar con la densidad básica a 1,30 m y con la densidad básica media de la 2<sup>o</sup> troza, como así también con los módulos de elasticidad y de rotura a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras. También se determinó que la longitud de traqueidas está fuertemente relacionada con el tamaño del árbol y con la longitud de la copa verde.

## **PALABRAS CLAVE**

Tratamiento silvicultural, ángulo microfibrilar; longitud de traqueidas, espesor de pared; propiedades de la madera.

## **ABSTRACT**

Argentine NE region is characteristic for culture of fast growing forest species in order to attend different timber markets. *Pinus taeda* represents one of the most important species, due to the high growing rate and wood characteristics, which makes it suitable for various industrial uses. It is assumed that the raw material resulting from these plantations could present a high percentage of juvenile wood, low density, low value of modulus of elasticity and modulus of rupture and high micro-fibrillar angle, which would adversely affect technological properties of the wood. With the aim of evaluating the influence of the silvicultural treatment of thinning on the anatomical, physical and mechanical properties of *Pinus taeda* wood of 20 years of age from a plantation with an initial density of 1960 plants/ha, on which different intensities of thinning were applied (0%, 50%, 75% and 87.5% of the initial density). Plantation was located in the Department Iguazú, of Misiones province, Argentina. From this plantation samples were

extracted at 1.30 m height and at different radial distances from a total of 24 trees, with 6 trees for each thinning treatment. The different variables were measured arriving to the following results, the values of bending strength, basic density and tracheids length, were similar for treatments with 0%, 50% and 75 % thinning. However for a stronger 87.5% thinning treatment these properties were adversely affected, except for the length of tracheids which were longer for this treatment. Values of parallel to the fibers compression strength and wood density at 1.30 m height, decreased for thinning intensities equal or greater than 75%. Without thinning treatment showed higher average volumetric shrinkage (11%), because the tracheids had higher proportion of late wood and thicker walls. Treatments with 0 % and 50% of thinning favored obtaining better values for the wall thickness and the micro-fibrillar angle. Anatomical, physical and mechanical properties were substantially improved in the direction going from pith to bark, regardless of the intensity of thinning. It is concluded that with 50% thinning an improvement in all wood properties evaluated in this work was achieved, with 75 % thinning some properties were affected, and with an 87.5 % thinning all properties have experimented significant changes. Moderate associations were determined for micro-fibrillar angle to basic density at 1.30 m height and with the average basic density of the 2<sup>o</sup> log, as well as with the modulus of elasticity and modulus of rupture in static bending and in compression parallel to the fibers. It was also found that tracheid length is strongly related to tree size and the length of the green cover of the trees.

## **KEYWORDS**

Silvicultural treatment, micro-fibril angle, length of tracheids, wall thickness, wood properties.



## TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN .....	v
PALABRAS CLAVE .....	vi
ABSTRACT .....	vi
KEYWORDS.....	vii
TABLA DE CONTENIDOS.....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xii
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Hipótesis .....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Importancia de la especie .....	4
2.2 Angulo microfibrilar .....	4
2.2.1 Ángulo microfibrilar en madera juvenil y madura.....	7
2.2.2 Ángulo microfibrilar y contracción longitudinal.....	9
2.2.3 Ángulo microfibrilar y resistencia de la madera .....	10
2.2.4 Ángulo microfibrilar y densidad de la madera.....	10
2.2.5 Metodologías de determinación del ángulo microfibrilar.....	11
2.3 Espesor de pared y longitud de traqueidas.....	13
2.4 Leño juvenil y maduro .....	14
2.5 Propiedades físicas.....	15
2.5.1 Densidad básica.....	15

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1 Caracterización del sitio.....	17
3.2 Caracterización del rodal.....	18
3.3 Selección de los árboles.....	18
3.4 Variables estudiadas.....	19
3.5 Toma de muestras.....	19
3.6 Preparación de muestras y determinación de las propiedades de la madera.....	22
3.6.1 Caracteres anatómicos.....	22
3.6.1.1 Preparación de macerados.....	22
3.6.1.2 Descripción de la técnica.....	22
3.6.1.3 Medición de caracteres anatómicos.....	23
3.6.2 Leño tardío.....	24
3.6.3 Densidad básica.....	24
3.6.4 Contracción e hinchamiento.....	25
3.6.4.1 Hinchamiento total.....	26
3.6.4.2 Contracción.....	26
3.6.4.3 Contracción total.....	26
3.6.4.4 Coeficiente de retractabilidad o contracción de la madera.....	26
3.6.4.5 Anisotropía del hinchamiento y de contracción.....	26
3.6.4.6 Punto de saturación de las fibras.....	26
3.6.5 Propiedades mecánicas de la madera.....	28
3.6.5.1 Módulo de elasticidad y módulo de rotura a flexión estática ..	28
3.6.5.2 Compresión paralela a las fibras.....	29
3.6.6 Humedad.....	30

3.7	Análisis de datos .....	30
3.7.1	Análisis de la varianza (ANOVA) .....	31
3.7.2	Modelos lineales generalizados mixtos (ANCOVA) .....	31
3.7.3	Análisis de correlación.....	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
4.1.	Características de los árboles muestreados .....	35
4.2	Identificación de datos atípicos y normalidad.....	36
4.3	Modelos lineales generalizados mixtos.....	37
4.3.1	Ángulo microfibrilar.....	37
4.3.2	Espesor de pared celular.....	41
4.3.3	Longitud de traqueidas .....	44
4.3.4	Porcentaje de leño tardío .....	47
4.3.5	Densidad básica a 1,30 m de altura .....	47
4.3.6	Densidad básica media de la 2 <sup>o</sup> troza .....	49
4.3.7	Contracción e hinchamiento .....	50
4.3.8	Humedad.....	52
4.3.9	Resistencia a la flexión estática .....	52
4.3.10.	Resistencia a la compresión paralela a las fibras.....	56
4.4	Asociación entre variables .....	58
5.	CONCLUSIONES .....	63
6.	REFERENCIAS .....	65
	ANEXO 1: MEDICIONES.....	77
	ANEXO 2: FOTOGRAFIAS.....	78
	ANEXO 3: GRÁFICOS DE CAJAS .....	84
	GLOSARIO .....	87

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1: Coeficientes de correlación entre los valores de AMF determinado con diferentes técnicas.
- Tabla 3.1: Variables estudiadas, altura de toma de la muestra y normas empleada para determinar las variables respuestas.
- Tabla 4.1: Resumen por tratamiento de parámetros dendrométricos del material muestreado.
- Tabla 4.2: Resultados de la prueba de Shapiro Wilks.
- Tabla 4.3: Medias de AMF para intensidad de raleo por posición radial.
- Tabla 4.4: Medias de AMF para intensidad de raleo por tipo de leño.
- Tabla 4.5: Medias de AMF para posición radial por tipo de leño.
- Tabla 4.6: Variación de la longitud de traqueida para la posición radial por tipo de leño.
- Tabla 4.7: Valores medios de contracción volumétrica, tangencial, radial y axial, coeficiente medio de contracción, anisotropía y punto de saturación de fibras.
- Tabla 4.8: Contracción volumétrica según la posición de la muestra.
- Tabla 4.9: Valores de MOE y MOR determinado por otros autores.
- Tabla 4.10: Valores medios de resistencia a la compresión para probetas externas e internas.
- Tabla 4.11: Matriz de correlaciones de Pearson/probabilidad para variables dasométricas y caracteres anatómicos.
- Tabla 4.12: Matriz de correlaciones de Pearson/probabilidad para distintas propiedades de la madera.
- Tabla A.1: Valores de los parámetros dendrométricos del material muestreado.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.a y b): Pared secundaria, capas.

Figura 2.1.c): Pared secundaria, composición.

Figura 2.2: Variación de propiedades en madera juvenil y madura.

Figura 2.3: Características de la madera de calidad para uso sólido.

Figura 2.4: Diagrama que ilustra el método utilizado para medir el ángulo microfibrilar.

Figura 3.1: Ubicación del ensayo de raleo de *Pinus taeda*.

Figura 3.2: Variación en el DAP medio a los 20 años para los 4 tratamientos de raleo.

Figura 3.3.a): Posición del árbol de donde se extrajeron las muestras.

Figura 3.3.b): Esquema de la secuencia de obtención de muestras para las diferentes propiedades.

Figura 3.4: Probeta para contracciones e hinchamiento en la madera.

Figura 3.5: Probeta para módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática.

Figura 3.6: Probeta para compresión longitudinal o paralela a las fibras.

Figura 4.1: Variación del AMF para los tratamientos de raleo y según la posición radial de la muestra.

Figura 4.2: Espesor de pared celular en función de la intensidad de raleo y la posición radial.

Figura 4.3: Espesor de pared para intensidad de raleo x posición radial.

Figura 4.4: Interacción entre posición radial y tipo de leño para espesor de pared celular.

Figura 4.5: Longitud de traqueida en función de la intensidad de raleo y la posición radial.

Figura 4.6: Porcentaje de leño tardío por tratamiento de raleo.

Figura 4.7: Variación de la densidad básica a 1,30 m según la intensidad de raleo y la posición radial.

Figura 4.8: Variación de la densidad básica de la troza según la intensidad de raleo y la posición radial.

Figura 4.9: Contracción volumétrica según la posición de la probeta.

Figura 4.10: Modulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática para los 4 tratamientos de raleo.

Figura 4.11: Módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática de muestras externas e interna.

Figura 4.12.a): Módulo de elasticidad a la flexión para intensidad de raleo x posición de la probeta.

Figura 4.12.b): Módulo de rotura a la flexión para intensidad de raleo x posición de la probeta.

Figura 4.13: Modulo de elasticidad y de rotura a la compresión paralela a las fibras para los 4 tratamientos de raleo.

Figura A.2.1: Desarme de árboles.

Figura A.2.2: Aserrado.

Figura A.2.3: Proceso macerado.

Figura A.2.4: Traqueidas para medición de espesor, longitud y ángulo microfibrilar.

Figura A.2.5: Ensayos de propiedades físicas.

Figura A.2.6: Ensayos mecánicos.

Figura A.3.1: Gráfico de cajas para las variables espesor de pared, longitud de traqueida y ángulo microfibrilar.

Figura A.3.2: Gráfico de cajas para las variables contracción tangencial y volumétrica, densidad básica de la troza, densidad básica a 1,30 m de altura y leño tardío.

Figura A.3.3: Gráficos de cajas para las variables módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras, contracción axial y radial.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se han desarrollado en la Argentina, a partir de la década de 1990, estudios forestales relacionados a aspectos biológicos y biométricos con una visión sistémica, lo que permite contar con información estructurada para las principales especies y emplearla constantemente para cuantificar existencias actuales, además el uso de la información que existe es relevante en la planificación de nuestros bosques a mediano y largo plazo. Sin embargo, existe un vacío en el conocimiento de las características anatómicas de los pinos de la región, que han sido sometidos a años de mejoramiento genético. Asimismo, existe información fragmentaria y escasa sobre aspectos relacionados a las propiedades externas e internas de la madera y el uso final de misma, lo que es fundamental, más aún cuando se trata de usos estructurales. Además la región NE de la Argentina se caracteriza por cultivar especies forestales de rápido crecimiento con la finalidad de atender a los diferentes mercados de madera. En este sentido, el *Pinus taeda* constituye una de las especies de mayor importancia, dada la extensa superficie implantada, su potencialidad de uso tanto para la construcción como carpintería en general, además por su alta tasa de crecimiento.

Se presume que la materia prima resultante de estas plantaciones presentará un alto porcentaje de leño juvenil, baja densidad, bajo valor de módulo de elasticidad y de rotura y alto valor de ángulo microfibrilar (AMF), estas características influyen negativamente en el proceso de transformación de la madera y sus propiedades tecnológicas son afectadas, ocasionando problemas, en la resistencia mecánica y en la durabilidad natural de las piezas que emplean ese tipo de materia prima (1).

El AMF tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas y en la estabilidad dimensional de la madera, y como tal es un parámetro indicador de la calidad de los productos de madera maciza (2). Así como las características químicas de la madera afectan la producción de pulpa y papel, sus características físico-mecánicas son determinantes para la



producción de madera sólida y sus rasgos anatómicos están relacionados con todos los procesos tecnológicos de la madera.

La orientación de las fibrillas en la capa S2 de la pared secundaria de las traqueidas determina en gran medida las propiedades de la madera (3), sobre todo la resistencia y la contracción tangencial y longitudinal (4), constituyendo un factor crítico en sus propiedades mecánicas (5), (6). La orientación de las puntuaciones y de los campos de cruzamiento en la pared de las traqueidas indica a menudo la alineación de las microfibrillas y ha sido empleado por varios autores para medir el AMF.

Debemos tener en cuenta que en Misiones actualmente la calidad del producto maderero se estima en base a conocimiento experto. Para ser competitivos, se debe apuntar a la obtención de madera de calidad, esto implica la incorporación de nuevas características que sean representativas de la aptitud de la madera para uso sólido, entre ellas, la densidad, contracción, módulo de elasticidad (MOE), módulo de rotura (MOR), longitud de traqueida, espesor de pared y el ángulo microfibrilar son consideradas de gran importancia. Pese a la influencia del AMF en las propiedades de la madera, las investigaciones son limitadas debido a lo dificultoso que resulta su medición.

### **1.1 Objetivo general**

Determinar la influencia del raleo sobre las características anatómicas de la madera y las propiedades físicas y mecánicas del *Pinus taeda* cultivado en la región NE de la Argentina.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Medir las características anatómicas de la madera (espesor de pared celular, longitud de traqueidas y ángulo microfibrilar) de *Pinus taeda*, en sentido transversal de la troza provenientes de diferentes intensidades de raleo.

- Determinar la densidad, humedad, contracción e hinchamiento y punto de saturación de fibras de las muestras extraídas.
- Determinar los módulos de elasticidad y de rotura a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras de las muestras.
- Comparar las propiedades físicas y mecánicas de la madera interna y externa del *Pinus taeda*.
- Correlacionar las características microscópicas con las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

### **1.3 Hipótesis**

- La intensidad de raleo influye sobre las características anatómicas y las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* plantado en la región NE de la Argentina.
- El ángulo microfibrilar es una de las principales variables determinante de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.
- Existe una relación inversa entre el ángulo microfibrilar y la resistencia mecánica de la madera.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Importancia de la especie

La especie de *Pinus taeda* es la conífera que más se implanta en el mundo por su alta productividad en madera, cerca de 12 millones de has, principalmente en EEUU seguido de Brasil, Argentina y Uruguay, siendo menos importante su cultivo en Sudáfrica y Australia (7); (8), (9), también en nuestro país, la región mesopotámica es la principal zona de bosques cultivados, precisamente la provincia de Misiones tiene la mayor concentración de pino implantado, 302.383 hectáreas, correspondiente a *Pinus elliotti* y *Pinus taeda*, considerando esta situación el conocer en profundidad las características y propiedades de esta madera es de suma relevancia para su manejo y para definir sus usos.

### 2.2 Angulo microfibrilar

La pared secundaria de las traqueidas consta de 3 capas, la S1, S2 y S3. En las figuras 2.1.a, 2.1.b y 2.1.c se pueden observar las capas que la constituyen, como así también la composición química.

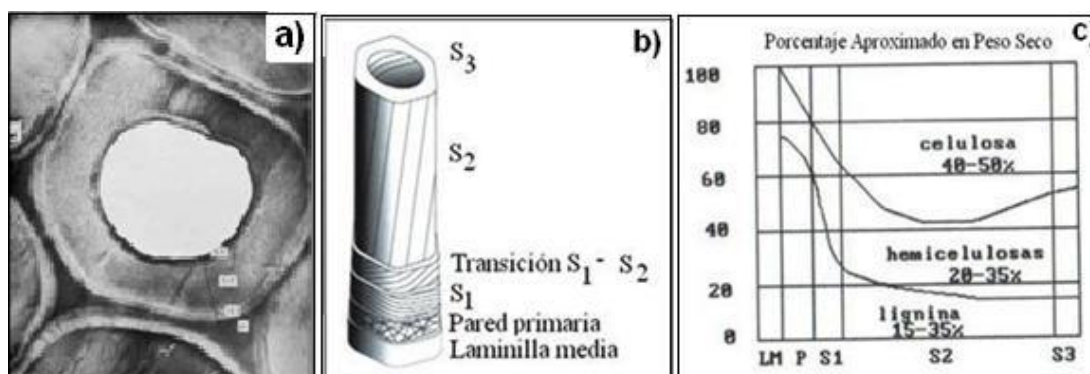


Figura 2.1.a y 2.1.b) Capas de la pared celular. 2.1.c) composición química de la pared celular. Fuente: 2.1.a) (10), 2.1.b) (11) 2.1.c) (12)

La celulosa está dispuesta en la pared celular formando microfibrilas que proveen soporte estructural a la misma, donde la capa S<sub>2</sub> contiene mayor proporción de celulosa.

Las microfibrilas se encuentran alineadas en hélice y el ángulo que forman con el eje de la pared celular es llamado ángulo microfibrilar (AMF) (13). Los autores Josza y Middleton (14) definen el ángulo microfibrilar como un promedio del ángulo helicoidal (espiral) que las fibrilas de la capa S2 de la pared celular forman con el eje longitudinal de la planta.

La orientación de las puntuaciones y de los campos de cruzamiento en la pared de las traqueidas indica a menudo la alineación de las microfibrilas y ha sido empleado por varios autores para medir el AMF (15); (16), (17); (18); (19); (20); (21) y (22).

El AMF ejerce un importante impacto en las propiedades del papel (4), también a medida que el AMF disminuye, la densidad básica (DB), el módulo de elasticidad y el módulo de rotura aumentan (13a), (23), (24a), (25). Donaldson (4) y Meylan y Probine (26), concluyeron que el AMF y la densidad constituyen los principales indicadores de la calidad de la madera, marcando una fuerte relación con el módulo de elasticidad y la contracción tangencial y longitudinal. Esta es la principal razón de interés en estudiar esta propiedad de la pared celular en las coníferas. En maderas duras, también el AMF resulta de interés debido a su relación con las tensiones de crecimiento y la contracción (11). Para Lima (27) el AMF representa una importante característica ultra-microscópica que influye en la performance de los productos de la madera.

Según Walker y Butterfield (3) el AMF tiene dos efectos importantes en propiedades de la madera. En primer lugar, la rigidez de la pared celular aumenta enormemente (cinco veces) de la médula al cambium, cuando el AMF disminuye de  $40^{\circ}$  a  $10^{\circ}$ , confirmado por Via (28). En segundo lugar, la contracción longitudinal aumenta considerablemente con el AMF pero en una manera no lineal y es responsable de que algunas muestras se degraden totalmente en el secado (3). Walker y Butterfield (3) mencionan además, que la principal limitación del pino en los mercados estructurales es la falta de resistencia, y que a su vez, esta propiedad está estrechamente relacionada con la densidad.

La variación en el AMF cumple un propósito funcional en el crecimiento y es dependiente de la edad del árbol, se espera que árboles jóvenes presenten altos valores de AMF, pues las traqueidas deben ser flexibles para que el tronco se incline con el viento sin llegar a romperse (29). Lo contrario sucede en árboles adultos donde se necesita mayor rigidez para que el árbol soporte el aumento de peso del tronco y de la copa. Otra explicación, puede estar basada en el diámetro del tronco, muchas veces árboles con mayores diámetros presentan valores más elevados del AMF. Farber *et al.* (30) concluyeron que el aumento en el diámetro provoca la formación de leño de compresión, fuerzas de tracción y tensiones superficiales en el tronco que provocan un aumento en el ángulo microfibrilar.

El valor del AMF varía entre árboles y también dentro del mismo árbol, con la altura y en el sentido radial.

Se han desarrollado varios estudios anteriormente referido a la variación del AMF dentro de un árbol (31), (32), (33), (34), (35). Jordan *et al.* (34), analizando la variación del AMF, a través de modelos mixtos y empleando al árbol como variable aleatoria indicó que existe una variación significativa entre los árboles de un mismo rodal. Esto es un indicador de que, aparte de los distintos patrones de variación del AMF dentro de los árboles, otros factores como la calidad del micrositio y la genética podrían posiblemente desempeñar un papel clave en el desarrollo AMF. Además el AMF varía con los diferentes tratamientos silviculturales (36), (37), (38).

En el sentido radial, decrece desde la médula a corteza (5), (6), (21), (23), (24), (31), (35), (39), (40), (41), (42), (43).

Jones *et al.* (42) a los efectos de caracterizar la madera de *Pinus taeda* de edades comprendidas entre los 21 y 26 años, provenientes de plantaciones locales de tres regiones fisiográficas en Georgia (EE.UU.), representadas por 15 sitios diferentes, determinaron el AMF a través de espectroscopia NIR (Near infrared) obteniendo los valores 10,98°; 45,21° y 26,64° de mínimo, máximo y media respectivamente, para un total de 729 puntos de medición. Posteriormente Schimleck *et al.* (44), aumentando el tamaño de la muestra a

1637 puntos de medición obtuvieron para la misma especie valores de AMF de 9,6°; 51,0° y 26,3° de mínimo, máximo y media respectivamente. Por otro lado Donaldson (11) menciona que varios autores concuerdan en que el AMF promedio de la capa S2 de la madera madura de coníferas se encuentra entre 5 y 20° respecto al eje de la fibra, sin embargo señala que la madera juvenil presenta AMF entre 25° a 35° en promedio. Valores de 50° en anillos más próximos a la médula fueron reportados por Megraw (5), Bendtsen y Senft (6), particularmente en la base de los árboles, contribuyendo a una baja resistencia en los rollos basales. Ying *et al.* (45), reportaron valores de AMF de 33° en el anillo 1, 23° en el anillo 10 y 17° a los 22 años de edad en *Pinus taeda* de rápido crecimiento. También Jordan *et al.* (34), registraron AMF medios 15,9° y 19,4° en árboles de 20 a 27 años en diferentes zonas geográficas. Valores muy similares fueron obtenidos por Isik *et al.* (46).

### **2.2.1 Ángulo microfibrilar en madera juvenil y madura**

La orientación de las microfibrillas en la capa S2 de la pared celular de la traqueida de madera juvenil varía ampliamente dentro y entre los diferentes árboles (5).

Varios autores (47), (48) y (49) al comparar la madera juvenil con la madura, afirman que los ángulos microfibrilares de la capa S2 y otros caracteres como el diámetro del lumen, el contenido de lignina, el leño de reacción y la contracción longitudinal son mayores en madera juvenil. Sin embargo el largo de traqueidas, el espesor de pared celular, el contenido de celulosa, la densidad, la resistencia y la rigidez son mayores en la madera madura.

En la figura 2.2 se puede observar esquemáticamente las variaciones de las propiedades de la madera juvenil y madura (50)

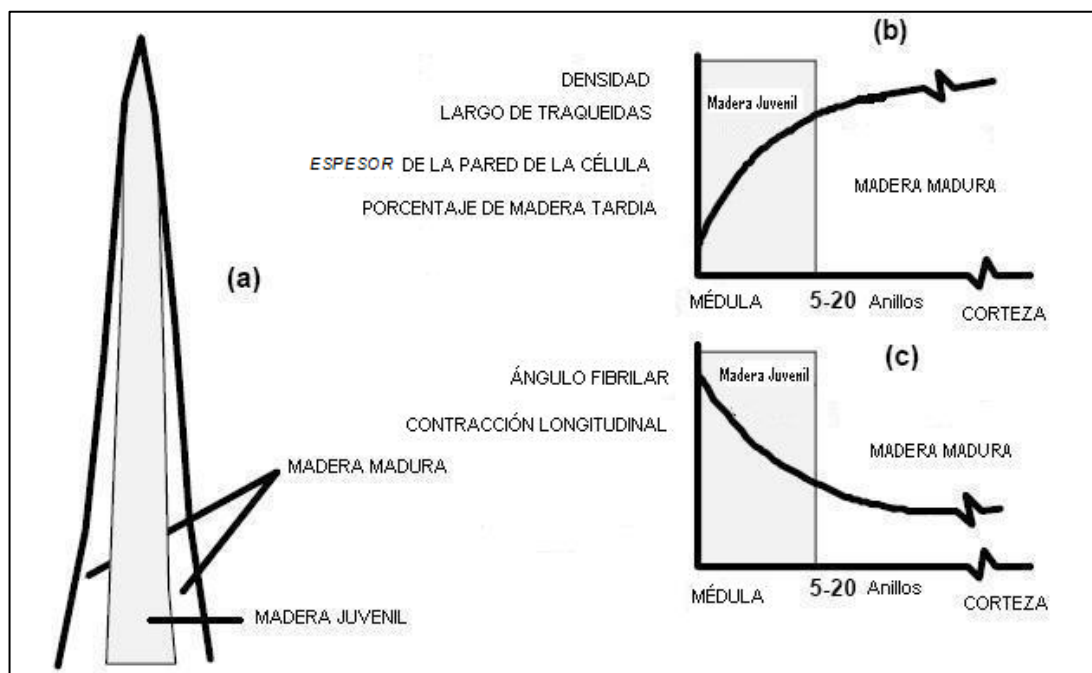


Figura 2.2: Variación de las propiedades de madera juvenil y madura. **(a)** Ubicación en el árbol de madera juvenil y madura. **(b)** Propiedades que se incrementan desde madera juvenil a madura. **(c)** Propiedades que decrecen de madera juvenil a madura. Fuente: (50)

Para Porta y Fadrique (51) los tratamientos silviculturales aceleraría la maduración del leño, con una disminución marcada en el valor del ángulo microfibrilar.

Para Macdonald y Hubert (2) las características de calidad más importantes para la madera aserrada estructural son propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional en el secado. Estos autores afirman que los árboles con espaciamientos amplios tienden a poseer, entre otras características, fuste poco recto, mayor inclinación del tallo, grandes nudos, menor densidad media, mayor ángulo microfibrilar, lo que resulta en madera aserrada de propiedades mecánicas inferiores y de menor estabilidad dimensional.

En la figura 2.3 se presenta de manera resumida las características que debe tener la madera para ser considerada de calidad para uso sólido.

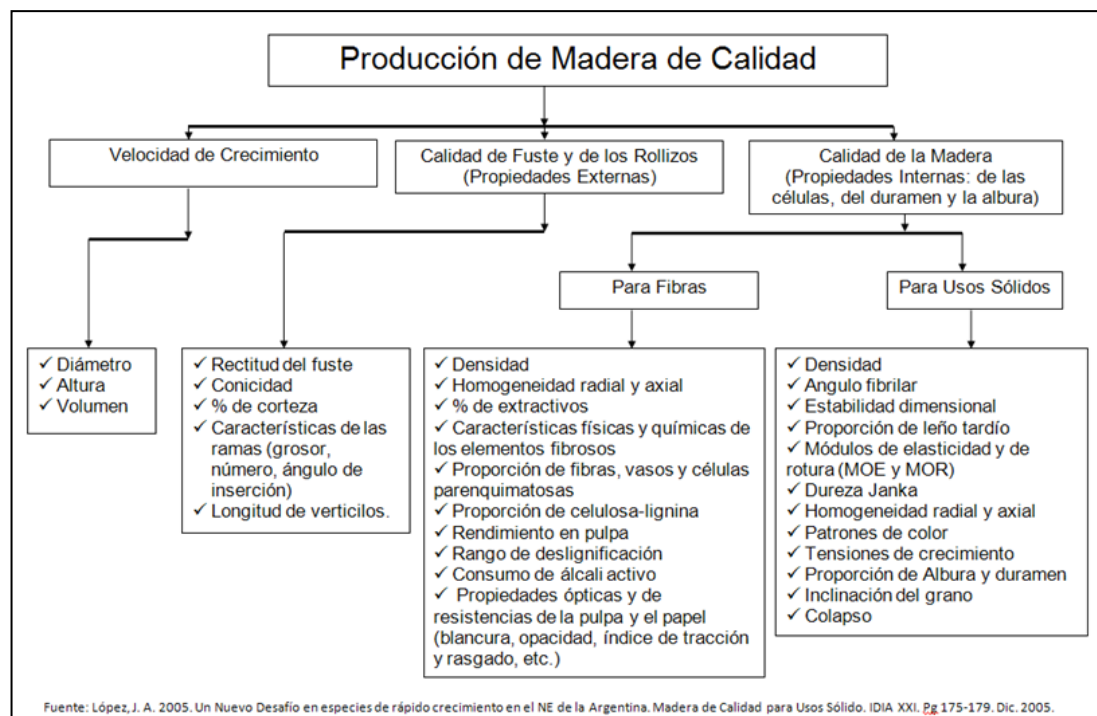


Figura 2.3: Características de la madera de calidad para uso sólido. Fuente (52).

La estabilización del AMF, de la longitud de traqueidas y el cambio en el grano en espiral indican la finalización del período juvenil y de una importante mejora de las propiedades de la madera desde el punto de vista tecnológico (53). Bendtsen y Senft (6) reportaron que los ángulos microfibrilares de *Pinus taeda* no habían alcanzado todavía valores estables a los 30 años de edad.

### 2.2.2 Ángulo microfibrilar y contracción longitudinal

Jankowski (54), considera que a mayor ángulo microfibrilar mayor contracción longitudinal, además afirma que el AMF disminuye desde la médula hacia la corteza, siendo ese cambio acentuado en la región de



madera juvenil y gradual en la madera madura. También Palma y Ballarín (55) afirman que las traqueidas cortas y de paredes celulares delgadas de la madera juvenil presentan mayor ángulo microfibrilar que las de la madera madura. Jozsa y Middleton (14) afirman que en madera juvenil o madera de compresión donde el AMF puede ser de  $45^\circ$ , la contracción longitudinal puede ser 10 veces más respecto a los valores para madera madura de leño normal. Meylan y Probine (26) determinaron un 6% de contracción longitudinal para valores de  $\text{AMF}=50^\circ$ . Por otro lado, Megraw (5) obtuvo valores de contracciones longitudinales entre 1% y 2,5% para valores de AMF entre  $45^\circ$  y  $50^\circ$ . También Vidaurre *et al.* (56) sostienen que la contracción longitudinal en madera juvenil puede ser un 9% superior (o más) que en la madera madura, lo que puede afectar la estabilidad dimensional de los productos constituidos con ese tipo de madera. Maderas con alta contracción longitudinal favorecen la aparición de deformaciones (torceduras, rajaduras, grietas) durante y después del aserrado, esto podría en algunos casos llegar a inviabilizar su uso.

### **2.2.3 Ángulo microfibrilar y resistencia de la madera**

El AMF también se utiliza para la selección de árboles con madera de mayor resistencia (3) (57). Dado que existe mayor variación en el AMF en madera juvenil que en madera madura (3), la inclusión de esta variable dentro de un programa de mejora, superaría a la selección tradicionalmente utilizada, selección por la densidad (3), (4), (31). En cambio Jordan *et al.* (34) consideran que el AMF junto a la densidad son los indicadores más importantes de la calidad de la madera para la industria forestal.

### **2.2.4 Ángulo microfibrilar y densidad de la madera**

Donaldson (11) afirma que la relación entre AMF y la densidad de la madera es variable.

Winck, *et al.* (58) determinaron para *Pinus taeda* de 15 años de edad proveniente de un sistema silvopastoril, una relación moderada y negativa ( $r = -0,59$ ) entre ángulo microfibrilar y densidad básica, donde los valores medios de AMF y densidad básica variaron de médula a corteza de  $56^\circ$  a  $42^\circ$  y de  $0,31 \text{ gr/cm}^3$  a  $0,42 \text{ gr/cm}^3$  respectivamente. Por lo tanto esto indica que la DB no sería un parámetro suficiente para inferir sobre la calidad estructural de la madera, dado que un 41% de la variación en AMF no es explicada por esta variable.

Isik *et al.* (46), sostienen que la DB actúa como un predictor variable y explica el 36% de la variación en el AMF. Para valores elevados de AMF y valores bajos de DB en *Pinus taeda*, la relación entre ambas variables es débil, mientras que mejora para valores de DB superiores a  $0,50 \text{ gr/cm}^3$  (44). Además la DB puede ser afectada por la composición química de las células, el ancho de la pared celular, el diámetro de las células y el porcentaje de leño temprano y tardío. Por otra parte, la DB está directamente relacionada con el porcentaje de leño tardío y aumenta radialmente hacia la corteza. Este comportamiento se da tanto en árboles de crecimiento lento como rápido.

Varios autores, entre ellos, Walker y Butterfield (3), Bendtsen y Senft (6) y Cown (59) sostienen que selección en base a la DB no sería el método más apropiado para identificar mejor la madera estructural, por lo que un programa de mejora en base a la densidad tendría beneficios limitados.

### **2.2.5 Metodologías de determinación del ángulo microfibrilar**

Es importante considerar que los valores de AMF varían también según la técnica empleada en su determinación, debe indicarse siempre la metodología utilizada.

Donaldson (11) realiza una descripción detallada de varias técnicas de determinación AMF. Como así también varios autores realizaron mediciones de AMF comparando diferentes técnicas (21), (39), (50), (60), (61).

Huang *et al.* (21), menciona que el empleo de las puntuaciones de las traqueidas (figura 2.4) para medir el AMF tiende a sobrestimar el AMF de las traqueidas de la madera temprana. El ángulo microfibrilar se mide trazando una línea paralela al eje de la traqueida que pase por el centro de la puntuación. Donde:  $\theta$  = ángulo microfibrilar. OA = orientación axial, AP = abertura de la puntuación, BP = borde de la puntuación, T = traqueidas.

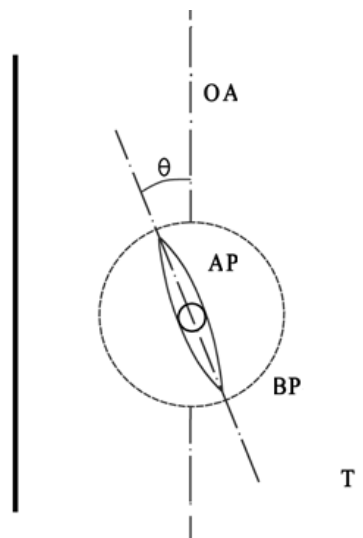


Figura 2.4: Diagrama que ilustra el método para medir el ángulo microfibrilar a través de las puntuaciones de las traqueidas de la pared celular de la capa S2. Fuente: (24).

Yin *et al.*, (24), ha determinado el ángulo microfibrilar a través de las puntuaciones sobre traqueidas de leño tardío, mientras que con rayos X empleó un corte con ambos tipos de leño (temprano y tardío), aun así obtuvo con la técnica de las puntuaciones, mayores valores de AMF. Senft y Bendtsen (18) consideran que esta metodología presenta la desventaja de que las puntuaciones no siempre se pueden encontrar en cantidades suficientes o en puntos específicos para satisfacer las necesidades del investigador. En algunas zonas puede presentarse un número relativamente elevado de puntuaciones fácilmente observables y en otras pueden observarse esporádicamente o pueden estar ausentes. En algunas especies las puntuaciones directamente no son visibles. Esta metodología, a pesar de sus limitaciones, es de fácil aplicación, no requiere de gran inversión y

permite evaluar la orientación de las microfibrilas en la capa S2 de pared secundaria de la madera de *Pinus taeda*. Se estima que podría no ser recomendable esta técnica para medir AMF en especies de latifoliadas.

Huang *et al.* (21) hizo determinaciones de AMF de *Pinus taeda* con diferentes metodologías de medición. En la tabla 2.1 se presentan los coeficientes de correlación entre los valores de AMF determinado con diferentes técnicas.

Tabla 2.1: Coeficientes de correlación entre los valores de AMF determinado con diferentes técnicas.

	Puntuaciones de las traqueidas de la capa S <sub>2</sub> de la pared celular 2 <sup>o</sup>
Luz polarizada	0,83
Técnica iodo (cortes con micrótopo)	0,71
Técnica iodo (macerados)	0,78
Ultrasonido	0,79
Difracción de rayos X	0,56

Fuente: (21)

El AMF es sensible al método de medición (24), sin embargo la selección del método para medir esta propiedad depende del equipamiento disponible.

### 2.3 Espesor de pared y longitud de traqueidas

Entre otras características, se acepta que el espesor de pared celular y la longitud de las fibras son atributos relevantes y cuyas variaciones están asociadas a la calidad papelera (62). Los parámetros dimensionales de las fibras han sido relacionados a través de índices de calidad papelera, como el coeficiente de afieltramiento (longitud de fibra/diámetro de fibra) cuyos mayores valores se asocia a las mejores resistencias de los papeles (62).

Se han descrito modelos de variación para la longitud de los elementos “fibrosos” tanto para especies resinosas como para latifoliadas, encuadrados en dichos postulados:

- a. En dirección radial, a cualquier nivel del árbol la longitud de traqueidas aumenta desde la médula a la periferia con la edad fisiológica hasta alcanzar una determinada dimensión que seguidamente se mantiene aproximadamente constante.
- b. En la dirección axial, en un mismo anillo de crecimiento, existe un gradual incremento de la longitud de las traqueidas hasta una cierta altura en el árbol, después de la cual se manifiesta un decrecimiento hacia el ápice.

Respecto a la variación radial, Ballarín y Palma (63) determinaron que la longitud de las traqueidas de *Pinus taeda* de 37 años de edad, tuvieron un aumento agudo y casi lineal en el rango de 66,5% hasta el anillo de crecimiento 18. Del anillo 18 hasta el último, la tasa de aumento en la longitud se mantuvo estable, prácticamente constante. Esta tendencia es característico de la formación de madera juvenil en los primeros años de edad del árbol. Un comportamiento similar fue observado por varios autores para madera de *Pinus* de rápido crecimiento (6), (48) y (64). Los autores afirman que la tasa de aumento en la longitud de las traqueidas se da más bien rápidamente en los primeros 10 y 15 anillos, y una reducción sucesiva en los anillos posteriores.

## **2.4 Leño juvenil y maduro**

En general se admite que con un aumento de la edad de los árboles las células cambiales producen elementos de mayores dimensiones. La madera juvenil está asociada a una edad fisiológica temprana de las células cambiales, tiene menor densidad, elementos fibrosos más cortos e inferiores propiedades de resistencia en comparación con la madera madura. La edad fisiológica del cambium, las proporciones relativas de madera juvenil y madera madura, tienen un efecto predominante en la variación del leño

dentro y entre los árboles, tanto en espesor de pared celular como en la longitud de las fibras. En general todas las propiedades de la madera mejoran en el leño maduro.

## **2.5 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas determinan el comportamiento de las maderas ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que este actúe química ni mecánicamente en su estructura interna. Los factores que influyen en las propiedades físicas son:

- ✓ La disposición y orientación de los componentes de la pared celular.
- ✓ Cantidad de sustancias básicas que conforman las paredes celulares.
- ✓ Porcentaje de material celulósico.
- ✓ Composición química de las sustancias básicas.
- ✓ Contenido de agua.

### **2.5.1 Densidad básica**

La densidad básica es una de las propiedades físicas más importantes de la madera, porque de ella dependen la mayoría de sus características físicas y mecánicas. En la práctica sirve para clasificarlas. En general, puede decirse que las más densas son más resistentes, elásticas y duras que las maderas livianas, pero son de más difícil trabajabilidad y pueden presentar mayor variación volumétrica. La densidad es la relación entre la masa,  $m$  en gr y el volumen  $v$ , en  $\text{cm}^3$  ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ). Es decir, que la densidad es la cantidad de materia leñosa por unidad de volumen. Como en los laboratorios, el peso y la masa se determinan de la misma forma, por medio de balanzas, se acepta que la masa es numéricamente igual al peso, ( $m = p$ ), lo que cambia es el sistema de unidades utilizado (se interpreta como masa en el "MKS" (metro kilogramo segundo) y como Peso en el sistema Técnico).

La densidad básica de la madera presenta una amplia variación debida a factores internos y externos. Posee un patrón de variación con la edad y dentro de un mismo individuo varía con la altura del árbol y en el sentido radial. Durante los primeros años el árbol produce madera con anillos de crecimiento anchos, donde hay una mayor proporción de madera temprana de baja densidad (65). Respecto a la altura, de manera general, la densidad es mayor en la base y va disminuyendo hacia la copa (5), independiente de la edad, pareciendo estar relacionado principalmente al porcentaje de leño tardío, que también aumenta significativamente en esta dirección. En el sentido radial, la DB aumenta desde la médula hacia la corteza (5), (58), (64), (65), (66), (67) y (68).

Barth *et al.* (65) han determinado la variación en la densidad básica en sentido longitudinal y transversal de *Pinus taeda* implantado en Misiones y en el norte de Corrientes, obteniendo un valor promedio de  $0,35 \text{ gr/cm}^3$  a edades de 3 a 15 años y de  $0,39 \text{ gr/cm}^3$  a edades de 20 años a más. Valores similares fueron reportados por Pereyra y Gelid (66), para edades entre 6 y 25 años.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Caracterización del sitio

Se trabajó con árboles provenientes de un ensayo de poda y raleo de *Pinus taeda* ubicado en el lote 13A, propiedad de la Empresa APSA S.A., en Puerto Bossetti, Departamento Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. Geográficamente se ubica a los 26° 18' S y 55° 38'O (figura 3.1). Se consideró únicamente el tratamiento de raleo.

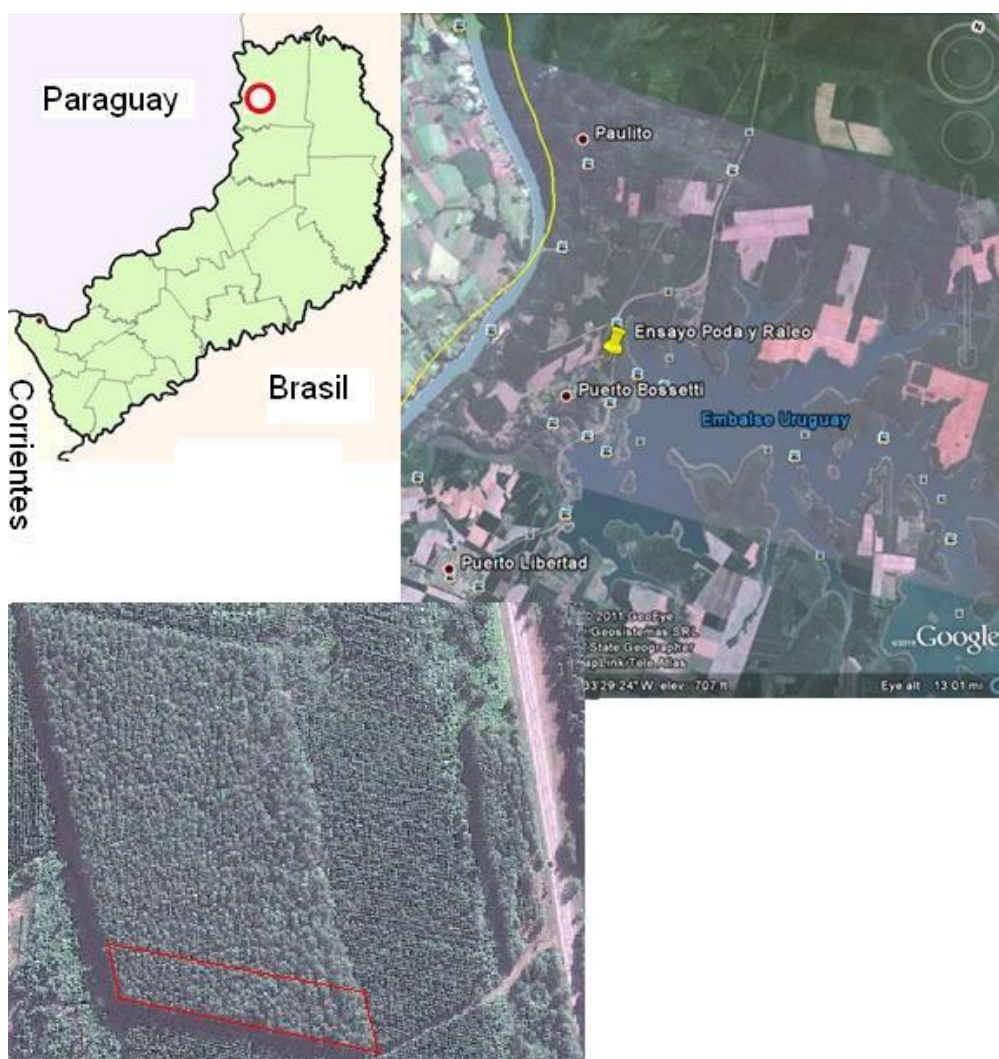


Figura 3.1: Ubicación del Ensayo de raleo de *Pinus taeda*

El suelo se clasifica como “Kandiudult” (69). Se caracteriza por un desarrollo en profundidad mayor a los 2 m con secuencia de horizontes y capas A-Bt-



C, rojo, libre de pedregosidad y fragmentos gruesos, permeabilidad moderada, bien drenado y relativamente insaturado.

El clima de la región se caracteriza por una temperatura media anual de 21°C y precipitaciones de alrededor de 2000 mm anuales, con régimen isohigro (70), (71).

### **3.2 Caracterización del rodal**

La plantación de *Pinus taeda* fue realizada en 1992 con una densidad inicial de 1960 plantas por hectárea, en 1995 se instaló el ensayo de raleo. Se adoptó el diseño sistemático clinal considerando una faja sin raleo (0%) y fajas con un 50 %, 75 % y 87,5 % de la densidad original (1960 plantas/ha). Cada faja constó de una bordura perimetral. El ensayo quedó constituido por cuatro tratamientos: T0=0%, T1=50%, T2=75% y T3=87% de raleo de la densidad original, con 1960, 980, 490 y 245 plantas por hectárea respectivamente.

### **3.3 Selección de los árboles**

Se seleccionaron 6 árboles de cada tratamiento (24 en total), sin condición de borde, con buen estado sanitario, con fustes derechos, sin bifurcaciones. Para la selección se tuvo en cuenta su posición fitosociológica: suprimidos (S), codominantes (CD) y dominantes (D) (72), se tomaron 2 ejemplares de cada estrato. Cada árbol fue correctamente identificado (número de árbol y lado norte), midiéndose el diámetro con cinta dendrométrica y la altura total con cinta métrica. Se apearon, se trozaron y se obtuvieron rodajas de 2,5 cm de espesor a diferentes longitudes.

En la figura 3.2 se puede observar el DAP medio y la cantidad de árboles por hectárea de *Pinus taeda* a los 20 años de edad para cada tratamiento de raleo.

En anexo 1, se presentan los valores de los parámetros dendrométricos de los 24 árboles utilizados para este estudio.

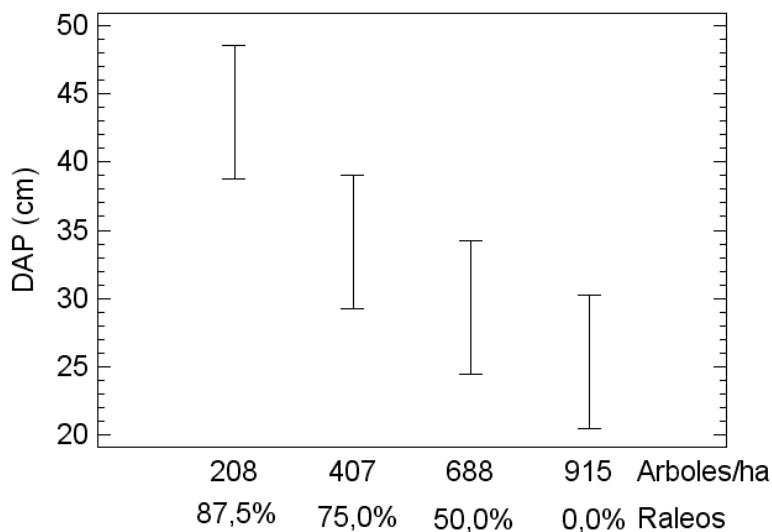


Figura 3.2: Variación en el DAP medio a los 20 años para los 4 tratamientos de raleo

### 3.4 Variables estudiadas

En la tabla 3.1 se detallan las variables estudiadas, la porción del árbol de donde se extrajo la muestra y la metodología.

### 3.5 Toma de muestras

Para medir las variables de interés se tomaron muestras en campo (figura A.2.1), que luego fueron procesadas en aserradero (figura A.2.2) y en el laboratorio de tecnología (figura A.2.5) y anatomía de la madera (figura A.2.3), de acuerdo con la propiedad a medir. Para ello se codificó cada árbol manteniéndose esta identificación a lo largo de todo el proceso.

Para determinar las propiedades mecánicas y físicas se tomaron los rollizos de 2,80 m de largo, 1 por árbol, obtenidos de la porción del fuste inmediatamente por encima de 1,30 m desde la base.

Los 24 rollizos fueron transportados al aserradero, donde se cortaron tablas de 1" de espesor y anchos variables. Las tablas se secaron en cámara y una vez secas, se marcaron y se elaboraron las probetas para determinar contracción, hinchamiento, coeficiente de contracción, anisotropía, módulo

de elasticidad y módulo de rotura a la flexión estática y compresión paralela a las fibras.

Tabla 3.1: Variables estudiadas, altura de toma de la muestra y normas empleada para determinar las variables respuestas.

	Variables Estudiadas	Altura de toma de la muestra	Metodología
Caracteres Anatómicos	Longitud de traqueidas.	Rodaja a 1,30 m	Macerado: Franklin (modificado), Mediciones: con Software para imágenes, siguiendo Normas IWA (73)
	Espesor de pared celular. Angulo microfibrilar.		
	% de leño tardío.		
Propiedades Físicas	Densidad básica a 1,30m.	rodaja a 1,30 m	Norma IRAM 9544 (74)
	Densidad básica media de la troza.	rodaja a 1,30m y 4,10m	
	Contenido de humedad.	Troza de 2,80 m inmediata sobre 1,30 m del suelo	Norma IRAM N° 9532 (75)
	Contracción e hinchamiento volumétrico.		Norma IRAM 9543 (76)
	Coefficiente de contracción.		
	Punto saturación de fibras.		
Anisotropía.			
Propiedades Mecánicas	MOE y MOR a la flexión estática.	Troza de 2,80 m inmediata sobre 1,30 m del suelo	Normas DIN 52186 (77) e IRAM 9542 (78)
	MOE y MOR a la compresión paralela a las fibras.		

Se extrajeron las rodajas a 1,30 m y 4,20 m para determinar la densidad básica promedio de troza, dado que a esa altura se tomaron las muestras para realizar los ensayos mecánicos. Los caracteres anatómicos y porcentaje de leño tardío se determinaron sobre las rodajas extraídas a 1,30 m de altura.

En la figura 3.3.a y 3.3.b se presenta el esquema de toma de muestras.

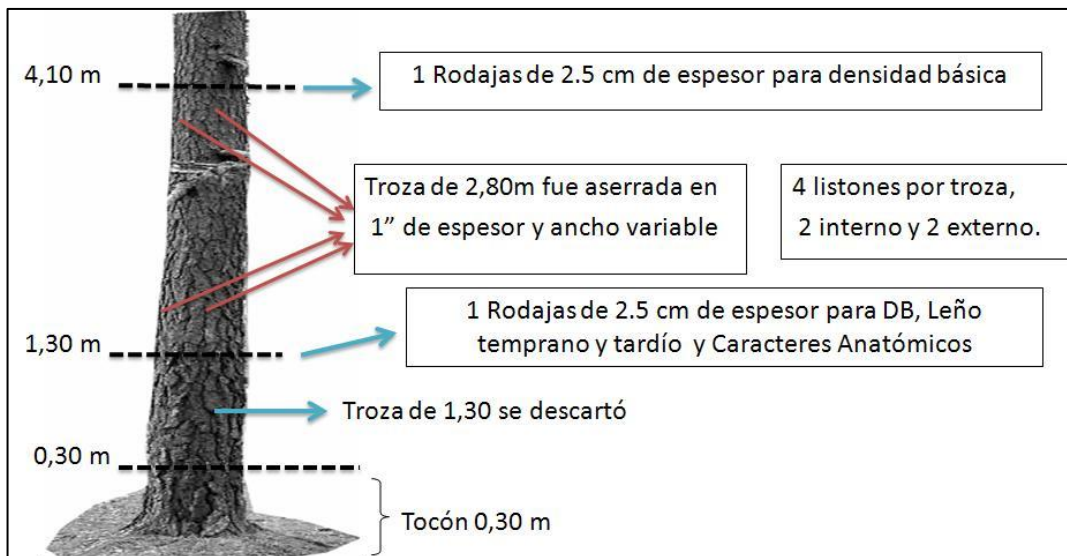


Figura 3.3.a: Posición del árbol de donde se extrajeron las muestras.

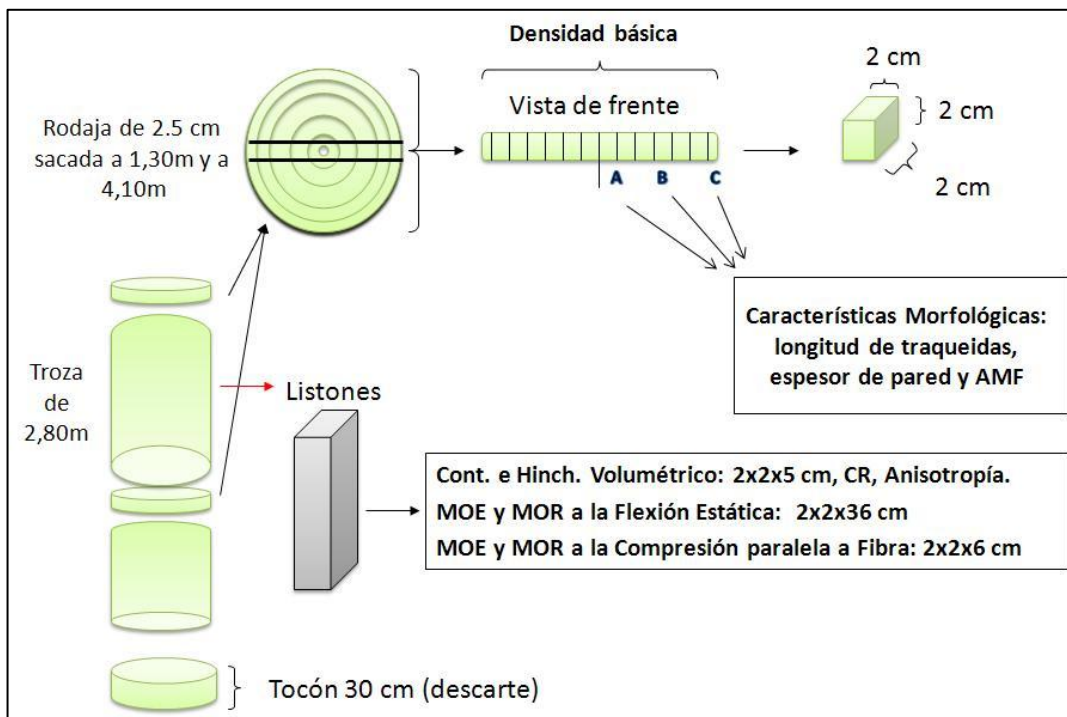


Figura 3.3.b: Esquema de la secuencia de obtención de muestras para las diferentes propiedades.

## 3.6 Preparación de muestras y determinación de las propiedades de la madera

### 3.6.1 Caracteres anatómicos

Para determinar el espesor de pared, la longitud de traqueida y ángulo microfibrilar se emplearon bloques de 2x2x2cm de tres sectores radiales, desde la médula hacia la corteza (lado Norte), que se identificaron como: interno (A: bloque inmediato a la médula), medio (B: al 50% del radio) y externo (C: el bloque adyacente a la corteza) (figura 3.3.b).

#### 3.6.1.1 Preparación de macerados

De los bloques, en sentido paralelo a las fibras, se cortaron con un formón, prismas (de tipo “palillos”) de 2 a 4mm de espesor y ancho, con largo de 20mm. Se realizó la impregnación de los prismas hirviéndola en agua durante 24 horas (hasta lograr el ablandamiento del material). Se empleó la técnica de maceración de Nuñez y Pavlik (79) dióxido de cloro-ácido acético-carbonato de sodio (Anexo A.2.3).

#### 3.6.1.2 Descripción de la técnica

Se aplicó el tratamiento con dióxido de cloro para ablandar o disolver lignina de la lámina media hasta llegar al punto de separación de fibras (no se requiere sacar la totalidad de la lignina). El dióxido de cloro es gaseoso a temperatura ambiente, tiene la ventaja de ser un agente selectivo y prácticamente no daña los polisacáridos.

La extensión del tratamiento con dióxido de cloro a temperatura ambiente (depende de la especie), fue necesario reponer el clorito de sodio. Se realizó el agregado de ácido acético a una solución de clorito de sodio, dado que no es demasiado fuerte para despolimerizar marcadamente los polisacáridos.

El tratamiento consistió en colocar los prismas en tubos de ensayos con suficiente cantidad de agua para cubrirlos completamente, se agregó el clorito en solución alcanzando una concentración final de 2-5% como cloro activo. Se mezcló y se agregó 5 ml de ácido acético concentrado agitándose continuamente. En unos instantes se observó la formación de dióxido de cloro que es un gas de color amarillo anaranjado. Se tapó el recipiente con papel de aluminio y se dejó bajo campana en laboratorio. El final del proceso se determinó empíricamente, se extrajeron los prismas y se colocaron a hervir en una solución de carbonato de sodio de 5-10% por 15-20 minutos hasta lograr el nivel necesario de deslignificación, o sea la separación de los elementos celulares. Luego de la deslignificación se realizó el lavado con agua de red para extraer toda la solución. Se pasaron fracciones de fibras suspendidas a portaobjetos y se tiñó con safranina al 1% para promover la coloración de las traqueidas y consecuentemente, facilitar la visualización de las mismas al microscopio. Una pequeña fracción de traqueidas coloreadas se transfirió con la ayuda de una aguja histológica a otro portaobjeto, agregándole media gota de glicerina y se cubrió con cubre objeto.

Se confeccionaron 5 láminas permanentes por cada una de las posiciones radiales, de cada lámina se sacaron 10 microfotografía por lámina, de manera de asegurar la obtención de 50 mediciones de AMF, espesor de pared y longitud de traqueida (figura A.2.4).

### **3.6.1.3 Medición de caracteres anatómicos**

Para las observaciones y fotomicrografías (Anexo A.2.4) se utilizó Microscopio óptico marca Zeiss Modelo Axiolab, la cámara fotográfica marca Moticam 2000 con software para mediciones celulares incorporado.

De cada muestra, se sacaron 50 fotomicrografías para cada característica anatómica.

El AMF se midió con la técnica de Huang (21) a través de las puntuaciones, utilizando el software UTHSCSA "Image Tool" para Windows versión 3.0 (80)

previamente calibrado. Para medir el espesor de pared y AMF se tomaron fotomicrografías de las traqueidas con un aumento de 1000X. En la fotomicrografía de cada traqueida se midieron tres ángulos microfibrilares.

Para longitud de traqueida se empleó un aumento de 40X. Las mediciones celulares se hicieron siguiendo las recomendaciones de las normas IAWA.

### **3.6.2 Leño tardío**

Se siguió la metodología propuesta por Barusso (81) que consiste en la marcación de cuatro radios sobre la rodaja de madera previamente pulida (anexo A.2.5) en la cual se mide, con una regla milimétrica, el ancho del crecimiento temprano y tardío de cada anillo. El promedio de los cuatro radios medidos en cada rodaja se toma como muestra representativa del anillo en cuestión. Esta metodología ha sido adoptada en la mayoría de los trabajos de análisis fustal (82) y (83). Todas las mediciones se almacenan en una planilla digital que calcula la media aritmética del leño temprano y tardío de los cuatro radios medidos en cada uno de los anillos. También se pueden emplear fotografías digitales y obtener los datos mediante análisis de imágenes.

### **3.6.3 Densidad básica**

De las rodajas obtenidas a la altura de 1,30 m y 4,20 m previamente lijada (anexo A.2.5), se sacó un listón central, desde la médula a la corteza (hacia la derecha y la izquierda), se marcaron un total de 624 probetas 2x2x2 cm (74), luego se cortaron con sierra circular. El volumen saturado de las mismas se determinó mediante el método de desplazamiento volumétrico, aplicando el principio de Arquímedes y luego se llevaron las probetas a la estufa a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C hasta peso constante para estimar densidad básica (DB) promedio ponderada de la troza de 2,80 m, aplicando la ecuación (1)

$$\text{Ecuación (1)} \quad DB = \frac{P_A}{V_S}$$

Donde DB= Densidad Básica ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),  $P_A$ =peso anhidro (g),  $V_S$  =volumen saturado ( $\text{cm}^3$ ).

Para el análisis estadístico, las probetas fueron agrupadas en tres secciones relativas a la longitud radial. La sección interna (A) de 0-33% del radio, media (B) de 33,1 a 67% y externa (C) de 67,1 a 100% del radio.

### 3.6.4 Contracción e hinchamiento

En las determinaciones de contracciones e hinchamientos en los tres planos de corte: tangencial, radial y longitudinal (anexo A.2.5), se utilizaron probetas de 2 centímetros de sección por 5 centímetros de longitud (76).

En la figura 3.4 se muestra el diseño de probeta con los 4 clavos para determinar la contracción e hinchamiento de la madera.

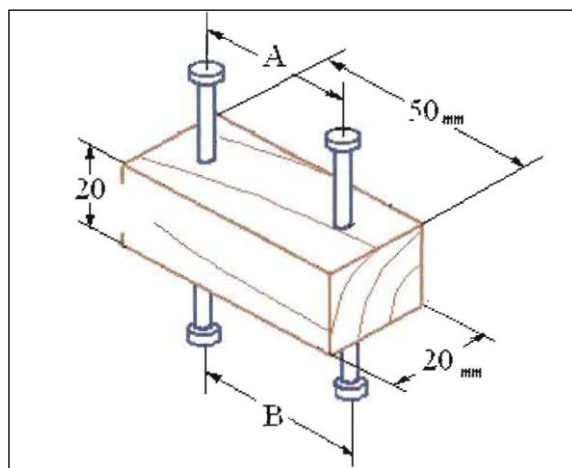


Figura 3.4: Probeta para determinar contracciones e hinchamiento en la madera

Para determinar el hinchamiento, contracciones del estado estacionado al anhidro, contracción total (del estado saturado al anhidro), coeficiente de retractabilidad o contracción de la madera, anisotropía y punto de saturación de las fibras, se aplicaran las siguientes ecuaciones 2, 3, 4, 5, 6, 7:



### 3.6.4.1 Hinchamiento total

$$\text{Ecuación 2: } H = \frac{(L_s - L_o)}{L_o} \times 100$$

### 3.6.4.2 Contracción

$$\text{Ecuación 3: } C = \frac{(L_e - L_o)}{L_e} \times 100$$

### 3.6.4.3 Contracción total

$$\text{Ecuación 4: } C_t = \frac{(L_s - L_o)}{L_s} \times 100$$

### 3.6.4.4 Coeficiente de retractabilidad o contracción de la madera

$$\text{Ecuación 5: } C_r = \frac{C}{H\%}$$

### 3.6.4.5 Anisotropía del hinchamiento y de contracción

$$\text{Ecuación 6: } A_c = \frac{\beta_t}{\beta_r}$$

### 3.6.4.6 Punto de saturación de las fibras

$$\text{Ecuación 7: } \text{PSF} = \frac{C_t}{C_r}$$

Siendo:

Ht = Hinchamiento máximo o total, en porcentaje.

Ls = Longitud saturada, en cm.

Lo = Longitud anhidra, en cm.

C = Contracción, en porcentaje.

Le = Longitud en estado estacionado, en cm.

Lo = Longitud anhidra, en cm.

Ct = Contracción total, en porcentaje.

$L_s$  = Longitud saturada, en cm.

$L_o$  = Longitud anhidra, en cm.

$Cr$  = Coeficiente de retracción.

$C$  = Contracción del estado estacionado al 12% de humedad al 0%.

$H\%$  = Humedad de las probetas, estacionada al 12%.

$Ac$  = Anisotropía de la contracción

$\beta_t$  = Contracción tangencial

$\beta_r$  = Contracción radial

PSF = Punto de saturación de las fibras.

$Cr$  = Coeficiente de retracción.

Si el coeficiente de anisotropía fuera 1 sería lo ideal, esto quiere decir que la variación, tanto en el sentido tangencial como radial, es igual, pero esto no ocurre en las maderas. Cuanto mayor es la relación entre la dirección tangencial y radial, mayor es el valor de anisotropía, y mayores dificultades tendrá en el secado. Las que presentan valores de anisotropía entre 1,2 a 1,5 son consideradas muy buenas, excelentes para usos donde no se permiten alabeos. Cuando los valores de anisotropía son de 1,6 a 1,9 la madera es considerada como normal, muy inestable; y con limitaciones en sus aplicaciones cuando el valor de anisotropía es mayor que 2.

El punto de saturación de fibras ocurre cuando las paredes celulares se encuentran totalmente saturadas y se ha eliminado toda el agua libre, quedando solamente el agua higroscópica o de imbibición. En las maderas de latifoliadas con porosidad difusa, el PSF se encuentra aproximadamente entre 32 y 35% de humedad. En coníferas y latifoliadas con porosidad anular varía entre 21 y 28%. En la práctica, con el fin de facilitar los cálculos, se generaliza el PSF en 28-30% de humedad sin especificar la especie. Cuando la madera se encuentra por encima del punto de saturación de fibras no sufre variación dimensional, solo aumento de peso y porcentaje de

humedad. Por debajo del punto de saturación de fibras comienza a producirse cambios en las dimensiones de la madera.

### 3.6.5 Propiedades mecánicas de la madera

Los rollizos fueron aserrados en 1" de espesor en ancho variable. Luego se seleccionaron tablas y se diseñaron 4 listones de 2 cm de sección por troza, 2 internos (leño juvenil) y 2 externos (leño maduro), éstos fueron correctamente identificados. Se elaboraron las probetas teniendo en cuenta las orientaciones y las dimensiones necesarias para cada ensayo. Los ensayos mecánicos fueron realizados en una máquina universal de ensayos (figura A.2.6).

#### 3.6.5.1 Módulo de elasticidad y módulo de rotura a flexión estática

Las probetas para determinar el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) a la flexión estática (figura 3.5) fueron de 2x2x36 cm (figura A.2.6), según indica la Norma DIN (Deutsche Industrie Norm) (77), Norma IRAM 9542 (78), y la IRAM 9545 (84) modificando la longitud de la probeta. La carga se aplica tangente a los anillos de crecimiento.

Para calcular el MOR y el MOE a la flexión estática se aplicaran las siguientes ecuaciones 8 y 9 respectivamente:

$$\text{Ecuaciones 8 y 9: } MOR = \frac{3PL}{2bh^2} \quad MOE = \frac{PL^3}{4bh^3f}$$

Donde:

MOR = módulo de rotura, en kg/cm<sup>2</sup>

P = Carga de rotura, en kg

b = Base, en cm.

L = Longitud entre apoyos, en cm

h = Altura, en cm

MOE = Modulo de elasticidad, en kg/cm<sup>2</sup>

$P'$  = Carga en el límite proporcional elástico, en kg.

$F$  = Deformación en el límite proporcional elástico, en cm.

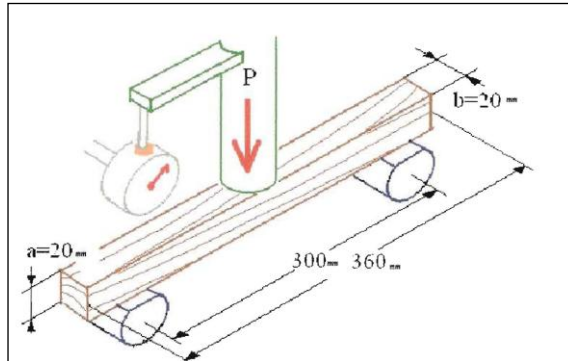


Figura 3.5: Probeta para determinar MOR y MOE a la flexión estática

### 3.6.5.2 Compresión paralela a las fibras

Para los ensayos de compresión paralela a las fibras se emplearon probetas de 2x2x6 cm de dimensiones (figura 3.6) (anexo A.2.6), según lo establecen las Normas IRAM 9541 (85) y DIN 52185 (86).

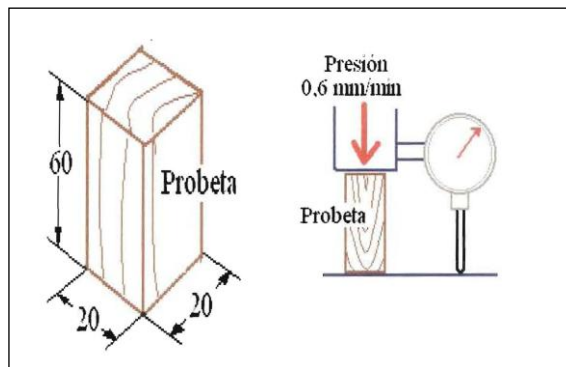


Figura 3.6: Probeta para determinar MOR y MOE a la compresión longitudinal

El módulo de rotura a la compresión (MOR) a la compresión se determina según la ecuación 10:

$$\text{Ecuación 10: } MOR = \frac{P}{S}$$

Donde:

MOR = Módulo de rotura, en kg/cm<sup>2</sup>.

P = Carga de rotura, en kg.

S = Sección, en cm<sup>2</sup>.

Para determinar el módulo de elasticidad a la compresión (MOE), se dibujan la curva de elasticidad para cada probeta ensayada, con el fin de obtener de ellas las cargas y deformaciones en el límite proporcional. El MOE se calcula mediante la ecuación 11:

$$\text{Ecuación 11: } MOE = \frac{P' * L}{S * f}$$

Donde:

MOE= módulo de elasticidad, en kg/cm<sup>2</sup>.

P'=carga en el límite proporcional elástico, en kg.

L=longitud de la probeta, en cm.

S=sección de la probeta, en cm<sup>2</sup>.

f=deformación, en cm.

### 3.6.6 Humedad

Se determinó el contenido de humedad de las muestras que fueron ensayadas mecánicamente. Es necesario conocer esta propiedad dado que influye en la resistencia mecánica de la madera. El contenido de humedad se determinó empleando el método por secado en estufa según indica la Norma IRAM N° 9532 (75), se determinó por la diferencia entre el peso en estado húmedo y el peso seco obtenido en la estufa a 103±2°C relacionados con el peso seco. Se utilizaron un total de 96 probetas.

### 3.7 Análisis de datos

Se realizaron diferentes tipos de análisis estadísticos, a fin de reunir la información necesaria para responder a los objetivos planteados.

### **3.7.1 Análisis de la varianza (ANOVA)**

Se aplicó un análisis de varianza a los efectos de evaluar las características de los árboles muestreados para los distintos tratamientos.

Para realizar el análisis de la varianza se identificó la presencia de datos atípicos mediante graficas de cajas (anexo 3) y se verificó el supuesto de normalidad de los errores con la prueba de Shapiro Wilks cuya hipótesis nula fue que la muestra de estudio proviene de una población con distribución normal. Para el análisis se utilizó un nivel de confianza de 95%.

### **3.7.2 Modelos lineales generalizados mixtos (ANCOVA)**

Dado que algunas variables no presentaron una distribución normal y no cumplieron con el supuesto de independencia fueron analizadas con modelos lineales generalizados mixtos.

Los modelos lineales generalizados mixtos brindan la posibilidad de analizar datos con estructuras de dependencia, desbalances y falta de normalidad. Los modelos mixtos se adecúan muy bien a situaciones que son comunes de encontrar en la agricultura y forestería (87). Por ejemplo cuando se realizan observaciones sobre la misma unidad experimental (árbol) repetidamente en varios momentos del tiempo, por lo tanto es razonable asumir que existen correlaciones entre observaciones dentro de un mismo sujeto (árbol). También los modelos mixtos permiten agregar variables aleatorias al modelo. Uno de los beneficios de emplear los modelos mixtos es que en muchas situaciones se incrementa la precisión de las estimaciones.

Dado que las variables estudiadas aquí se tratan de datos longitudinales (medidas repetidas de un mismo sujeto) no cumplen con el supuesto de independencia. Además luego de realizar las pruebas de normalidad, se tuvo que rechazar la hipótesis nula de que los datos provenían de una población normal.

Los modelos lineales generalizados mixtos permiten analizar factores e incluir covariables, por lo tanto se denominan modelos de análisis de covarianza (ANCOVA).

Un modelo lineal generalizado es un modelo de regresión (en el sentido amplio de la palabra) que consta de tres ingredientes claves: una componente sistemática, una componente aleatoria y la función de enlace “g”.

En los modelos no lineales, existen algunos que se denominan “linealizables”: son modelos en los que existe una función de la esperanza que es una función lineal de los parámetros del modelo. Es decir, existe una transformación (g) de  $E(Y)$  o de  $E(Y|\mu)$  que hace que  $g(E(Y|\mu))$  sea lineal.

Por ejemplo,  $\mu_y = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2}$  es linealizable porque existe una función

$g(t) = \frac{1}{t}$  que hace que  $g(\mu_y) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$ .

Si estos modelos linealizables provienen de datos cuya distribución es una familia exponencial (por ejemplo, distribución normal, gamma, binomial, Poisson, etc.) entonces tenemos un modelo lineal generalizado.

Un modelo lineal generalizado es un modelo que vincula las respuestas (variables “dependientes”) con otras variables “independientes” o “explicativas”. Tenemos que considerar tres componentes:

- a) La componente aleatoria (la distribución de las  $Y_i$ ). En general, se supone que las  $Y_i$  son independientes, con una distribución que sea una familia exponencial lineal (por ejemplo: normal, binomial, Poisson, gamma, la binomial, la binomial negativa, la chi cuadrado, la inversa gaussiana, la geométrica, la Poisson compuesta, las generadas por extremo estables, la secante hiperbólica generalizada, etc.
- b) La componente sistemática, que indica la relación entre las variables independientes. Éste es un modelo lineal (es decir, los parámetros entran

linealmente al modelo). Por ejemplo:  $\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ , donde  $\alpha, \beta_1, \beta_2$ , son coeficientes del modelo,  $x_1, x_2$  son variables explicativas.

- c) La función de enlace, que es la que vincula la media (esperanza) de la distribución de las  $Y_i$  con la componente sistemática. Por ejemplo,
- $$g \mu_i = \log \mu_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i}$$

La componente sistemática viene dada por:

$$(1) g(\mu) = X\beta$$

Donde  $g$  se denomina función de enlace, debe tener inversa,  $\mu$ =media esperada,  $X$ = son variables explicativas y se denomina matriz de diseño (fija) y se define  $\mu = E(Y)$ ,  $\beta$ =coeficientes del modelo.

Sustituyendo la última relación en (1), se establece que en estos modelos, el valor esperado de la variable aleatoria dependiente se relaciona con la componente lineal de regresoras, a través de la función de enlace (88). Es usual afirmar, que el esperado de  $Y$  se vuelve lineal en la escala dada por la función de enlace "g".

Los modelos lineales generalizados poseen una gran ventaja sobre los modelos lineales usuales, pues en ellos se permite la elección de la distribución de la variable dependiente dentro de una gama de distribuciones bastante rica y además permiten un análisis estadístico del modelo en cuestión que es válido para cualquier distribución que se haya escogido para la variable dependiente. Todo esto contribuye a estudiar la componente sistemática con una mayor libertad.

Para emplear estos modelos, se buscó la distribución (función de enlace "g") que mejor representaba los datos. Que fueron la Inversa Gaussiana, Gamma y Normal.

Se utilizó un nivel de confianza de 95%.

Para las propiedades mecánicas, contracción, densidad básica a 1,30 m, y densidad básica de la troza se consideraron los siguientes factores: intensidad de raleo, posición de la muestra, la interacción entre ambos



factores, se empleó el diámetro como covariable. Esta covariable reemplazó al factor estrato, dado que estrato fue definido en base al diámetro.

Para los caracteres anatómicos se adicionó además el factor tipo de leño y otras covariables, como ser, altura hasta la base de copa viva (hbcv), longitud de copa viva (lcv).

Para longitud de traqueidas, como existe variación significativa entre árboles (correlación de 0,44 con p-valor significativo igual a 0,03), se tomó al árbol como otra fuente de variación.

Para el porcentaje de leño tardío se tomaron los factores: intensidad de raleo y estrato.

Las variables no significativas fueron suprimidas del análisis.

### **3.7.3 Análisis de correlación**

También se realizaron análisis de correlación de Pearson para determinar si existe algún grado de asociación entre las variables internas (anatómicas) y externa (propiedades físicas y mecánicas) del árbol.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características de los árboles muestreados

En la tabla 4.1 se presentan los resultados de los valores medios determinados para el diámetro a la altura de pecho, altura total, diámetro en la base de la copa viva y altura a la base de la copa viva de los árboles muestreados, junto con el coeficiente de variación y la comparación de medias de los 4 tratamientos empleando el procedimiento basado en conglomerados, medias DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves) (89), para el 95% de probabilidad.

Tabla 4.1: Resumen por tratamiento de parámetros dendrométricos del material muestreado.

Trat. raleo	DAP		h		dbcv		hbcv		N
	medio (cm)	C.V.	media (h)	C.V.	medio (cm)	C.V.	media (m)	C.V.	
T0:0%	26,36 A	23,14%	24,16 A	9,59%	14,95 A	42,88%	16,31 A	4,59%	6
T1:50%	29,37 A	37,12%	24,92 A	14,63%	17,17 A	46,00%	15,60 A	23,38%	6
T2:75%	34,14 A	24,83%	26,13 A	15,57%	22,25 A	29,19%	14,65 A	14,21%	6
T3:87,5%	43,64 B	8,06%	25,52 A	10,05%	29,78 B	8,30%	11,00 B	32,18%	6
<b>Total</b>	<b>33,38</b>	<b>29,49%</b>	<b>25,18</b>	<b>12,33%</b>	<b>21,03</b>	<b>38,88%</b>	<b>14,39</b>	<b>23,09%</b>	<b>24</b>

Donde Trat.=intensidad de raleo; DAP=diámetro medio a la altura de pecho; h=altura total; dbcv=diámetro en la base de la copa viva; hbcv=altura hasta la base de la copa viva del árbol.

Los valores medios señalados con letras iguales no difieren estadísticamente entre sí, según test de DGC al 95% de probabilidad.

Los valores de diámetro a la altura de pecho y diámetro en la base de la copa viva aumentan con la intensidad de raleo, presentando menor dispersión (coeficiente de variación) en el T3 y mayor en el T1, mientras que la altura hasta la base de copa viva disminuye con la intensidad de raleo. Para estas tres variables (dap, dbcv y hbcv), el T3 fue estadísticamente diferente a los demás tratamientos. Los valores de altura total se

mantuvieron constantes para los cuatro tratamientos. Los árboles del tratamiento sin raleo, con mayor número de individuos por hectárea, tuvieron menor crecimiento en diámetro, probablemente debido a la competencia por agua, luz y nutrientes. El raleo favoreció al crecimiento radial, siendo más notable en el de mayor intensidad.

#### 4.2 Identificación de datos atípicos y normalidad

Se realizan gráficos de cajas para las variables, espesor de pared, longitud de traqueidas y ángulo microfibrilar (figura A.3.1), densidad básica de la troza y a 1,30m de altura, leño tardío, para contracción tangencial, volumétrica (figura A.3.2), contracción axial y radial (figura A.3.3), para el módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras (figura A.3.3). Estos gráficos permiten detectar la presencia de datos atípicos si los hubiera. Se eliminaron 2 datos atípicos para la variable módulo de rotura a la compresión y se realizó la prueba de Shapiro Wilks. Solamente las variables módulo de elasticidad a la compresión, contracción radial, tangencial y volumétrica se distribuyen normalmente, por lo tanto se decidió analizar los datos con modelos lineales generalizados mixtos. La tabla 4.2 muestra el valor del estadístico de Shapiro Wilks ( $W^*$ ) y su valor de probabilidad asociado para las variables estudiadas.

Tabla 4.2: Resultados de la prueba de Shapiro Wilks.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p-valor
Angulo microfibrilar (°)	7432	40,10	11,37	0,99	<0,0001
Espesor de pared (µm)	3534	3,45	0,88	0,98	<0,0001
Longitud de traqueidas (µm)	3578	3351,51	1173,62	0,97	<0,0001
Leño tardío (%)	24	52,52	1,36	0,88	0,0210
DB a 1,30m (gr/cm <sup>3</sup> )	278	0,42	0,08	0,94	<0,0001
DB troza (gr/cm <sup>3</sup> )	610	0,41	0,09	0,95	<0,0001
Contracción axial (%)	96	0,44	0,20	0,94	0,0030
Contracción radial (%)	96	3,33	1,03	0,96	0,0812
Contracción tangencial (%)	96	6,17	1,10	0,97	0,1060
Contracción volumétrica (%)	96	9,95	1,70	0,98	0,6130
MOE a la flexión (MPa)	96	9451,95	3454,52	0,94	0,0021
MOR a la flexión (MPa)	96	79,20	26,56	0,92	<0,0001
MOE a la compresión (MPa)	96	1701,00	514,00	1,00	0,0289
MOR a la compresión (MPa)	94	39,11	11,00	0,96	0,0679

### 4.3 Modelos lineales generalizados mixtos

#### 4.3.1 Ángulo microfibrilar

El ángulo microfibrilar aumentó con la intensidad de raleo. Los tratamientos T0 y T1 presentaron menor valor de AMF (30,8°), seguido del T2 con 32° y T3 con 34° (figura 4.1). Con el tratamiento de 87,5% de raleo de la densidad original se obtuvo mayor ángulo microfibrilar. Valores superiores para *Pinus taeda* fueron encontrados por Huang *et al.* (21).

Para las intensidades de raleo estudiadas, los menores valores de AMF se lograron con los tratamientos 0% y 50% de raleo.

El AMF decrece en dirección de la médula hacia la corteza, con valores medios de 34°, 33° y 29° para las posiciones radiales A, B y C, representando una disminución en el AMF de A-B y A-C de 5% y 15% respectivamente (figura 4.1).

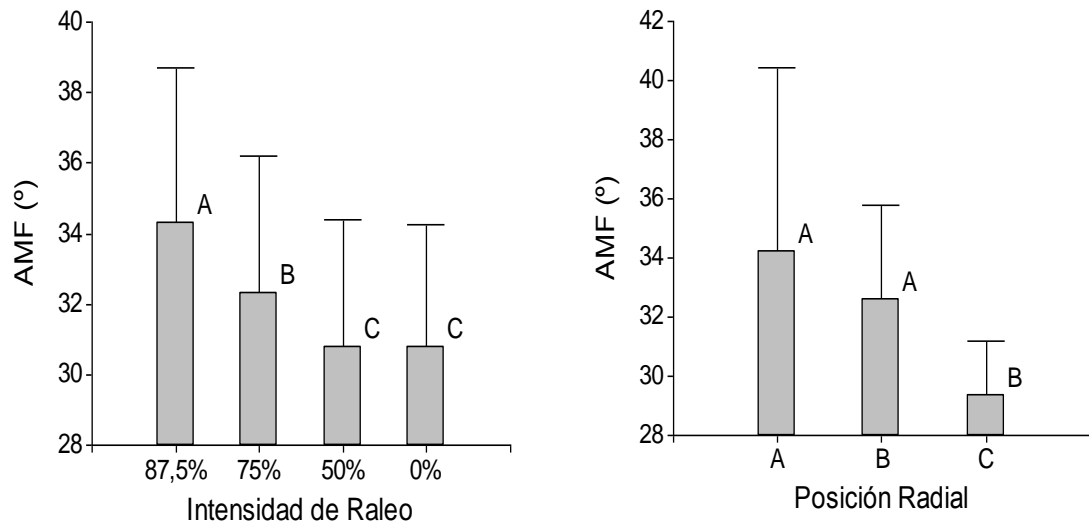


Figura 4.1: Variación del AMF para los tratamientos de raleo y según la posición radial de la muestra.

La disminución radial en el valor del AMF también fue señalada por otros autores (5), (6), (21), (23), (24), (31), (35), (39), (40), (41), (42) y (43), asociando claramente valores altos de ángulo microfibrilar a la presencia de madera juvenil cercana a la médula.

Cave y Walker (90) indicaron que el MFA para *Pinus taeda* L. disminuye a partir de la primera célula de madera temprana hasta la última célula de la madera tardía. Con valores altos cerca de la médula y disminuye hacia la corteza. Primero lo hace rápidamente, luego continúa la disminución gradual y por último se hace más lenta hasta que se estabiliza.

El crecimiento lento (cerca de la corteza) podría producir una fibra de estructura más compacta con menos madera temprana, lo que resulta en valores de AMF más bajos (34).

Winck *et al.* (58) determinaron para *Pinus taeda* de 15 años de edad proveniente de un sistema silvopastoril, valores medios de AMF que variaron de médula a corteza de  $56^{\circ}$  a  $42^{\circ}$ , lo que representa una disminución del 25%. También Ying *et al.* (45), reportaron una disminución radial de 30% en el valor de AMF para *Pinus taeda* de 22 años de edad. Mientras que Jordan

*et al.* (34), registraron una disminución de 18% en el valor del AMF en árboles de 20 a 27 años en diferentes zonas geográficas. Valores muy similares fueron obtenidos por Isik *et al.* (46), lo que estaría indicando que para una mayor edad del árbol, se esperaría tener menor variación radial del AMF.

Los valores medios de AMF registrados para las traqueidas correspondiente al leño temprano y tardío fueron de 42° y 22° grados respectivamente. El valor del AMF para el leño temprano prácticamente duplica al valor del AMF encontrado para el leño tardío.

Las tablas 4.3 y 4.4 muestran los grupos homogéneos determinados para las interacciones entre intensidad de raleo por posición radial (p-valor=0,0001) e intensidad de raleo por tipo de leño (p-valor=0,0001) para la variable AMF.

Tabla 4.3: Medias de AMF para intensidad de raleo por posición radial.

Intensidad de raleo	Posición radial	AMF medio	Grupo
87,5%	A	36,02	A
75%	A	35,28	A
87,5%	B	34,41	A
0%	A	33,02	B
50%	A	32,52	B
87,5%	C	32,47	B
75%	B	32,20	B
50%	B	31,88	B
0%	B	31,83	B
75%	C	29,50	C
50%	C	28,00	D
0%	C	27,53	D

Podemos demostrar con estos valores, que la madera más cercana a la corteza, como así también la madera con mayor porcentaje de leño tardío

favorecerá la obtención de madera de mejor calidad dado que el AMF disminuye considerablemente.

Tabla 4.4: Medias de AMF para intensidad de raleo por tipo de leño.

Intensidad de raleo	Tipo de leño	AMF medio	Grupo
87,5%	temprano	44,75	A
0%	temprano	42,42	B
75%	temprano	40,80	C
50%	temprano	40,19	C
75%	tardío	23,85	D
87,5%	tardío	23,85	D
50%	tardío	21,41	E
0%	tardío	19,17	F

No se encontró interacción entre los factores posición radial y tipo de leño ( $p$ -valor=0,4716). El leño tardío presentó menores valores de AMF independientemente de la posición radial (tabla 4.5). El tipo de leño es una fuente de variación importante para AMF. Las traqueidas provenientes del leño tardío y de la posición radial A presentan menor AMF que las del leño temprano de la posición radial C.

Tabla 4.5: Medias de AMF para posición radial por tipo de leño.

Posición radial	Tipo de leño	AMF medio	Grupo
A	temprano	44,67	A
B	temprano	42,47	B
C	temprano	38,99	C
A	tardío	23,75	D
B	tardío	22,69	D
C	tardío	19,76	E

Si bien sería de esperar menores valores de ángulos microfibrilares para la edad de 20 años, se debe tener en cuenta que la técnica de medición empleada sobreestima los valores, sobre todo para las traqueidas de madera temprana.

#### 4.3.2 Espesor de pared celular

El espesor de pared fue mayor en el tratamiento con 0% y 50% de raleo, con valores de 3,60  $\mu\text{m}$  y 3,64  $\mu\text{m}$  respectivamente. Sin embargo para las intensidades de raleo de 75% y 87,5% los espesores fueron iguales (3,55  $\mu\text{m}$ ), aunque hubo una disminución. Se notó una tendencia: al aumentar la intensidad de raleo, disminuyó el espesor de pared celular. Respecto a la posición radial, incrementa desde la medula hacia la corteza, con valores medios de 3,24  $\mu\text{m}$ , 3,62  $\mu\text{m}$  y 3,92  $\mu\text{m}$  para las posiciones radiales A, B y C respectivamente. La posición radial C presentó mayor espesor de pared celular siendo estadísticamente superior a los valores de la posición radial A y B.

En la figura 4.2 se muestra como varió el espesor de pared según el tratamiento de raleo aplicado y según la posición radial.

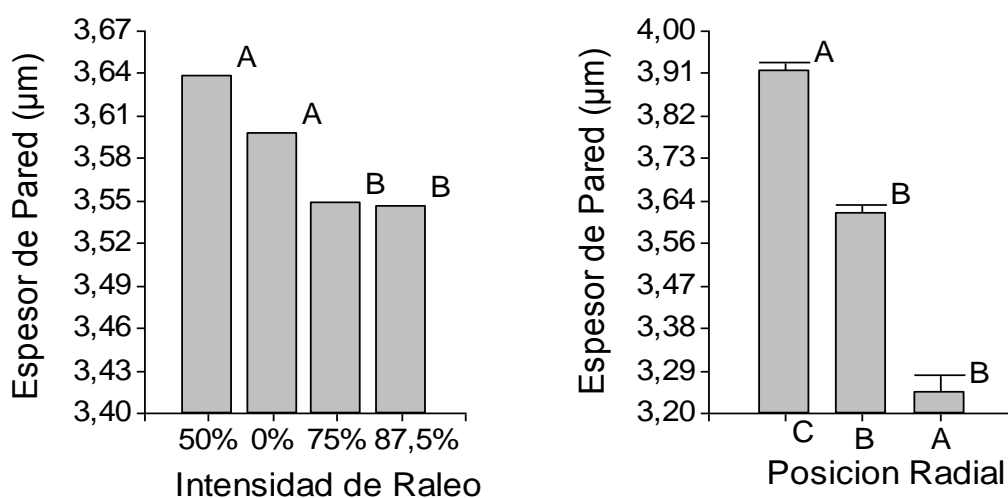


Figura 4.2: Espesor de pared celular en función de la intensidad de raleo y la posición radial.



Los valores medios de espesor de pared obtenidos para las traqueidas de leño temprano y tardío fueron estadísticamente diferentes, registrándose valores medios de 3,04  $\mu\text{m}$  y 4,22  $\mu\text{m}$  respectivamente. Lo que es lógico, dado que el leño tardío se caracteriza por presentar traqueidas más alargadas y con mayor espesor de pared.

Con los tratamientos de 0% y 50% se obtuvieron valores estadísticamente iguales de AMF y espesor de pared.

Respecto a las interacciones entre intensidad de raleo y posición radial fueron significativas ( $p$ -valor=0,0001). Se determinaron dos grupos estadísticamente diferentes. El grupo A que presentó mayor espesor de pared. Formaron parte de este grupo la posición radial C para todos los tratamientos, con el siguiente orden T0, T1, T2 y T3 y la posición radial B del T0. Y el grupo B, con menor espesor de pared, quedó conformado por las restantes posiciones radiales B y A para los 4 tratamientos. La posición radial A del T0 presentó menores espesores de pared.

En la figura 4.3 se presentan las interacciones entre intensidad de raleo por posición radial para el espesor de pared.

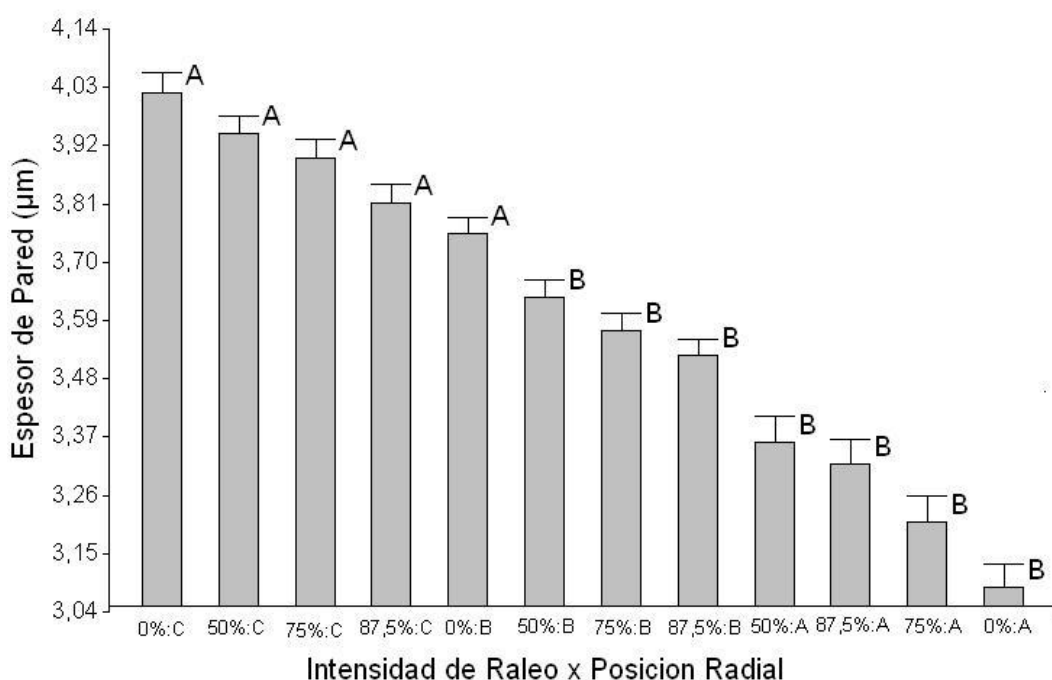


Figura 4.3: Espesor de pared para intensidad de raleo por posición radial.

Las interacciones entre intensidad de raleo y tipo de leño resultaron significativas ( $p$ -valor=0,0006). Se evidenció que para los 4 tratamientos el espesor de pared de las traqueidas de leño tardío es muy superior al de las traqueidas de leño temprano. El valor medio del espesor de pared para los 4 tratamientos, fue un 28% mayor en las traqueidas del leño tardío.

Respecto a la interacción entre posición radial y tipo de leño arrojaron diferencias significativas ( $p$ -valor=0,0001). Se identificaron 3 grupos. Se observó que el espesor de pared aumentó radialmente, tanto en leño temprano como tardío. También se detectó que el espesor de pared del leño tardío de la posición radial A es mayor que el espesor de pared del leño temprano de leño de la posición radial C, y que el menor valor espesor de pared se registró para el leño temprano de la posición radial A. Esto nos está indicando que el espesor de pared celular de las traqueidas varía en mayor medida con el tipo de leño que con la posición radial de donde se extrajo la muestra.

En la figura 4.4 se muestra interacción entre posición radial por tipo de leño para espesor de pared celular.

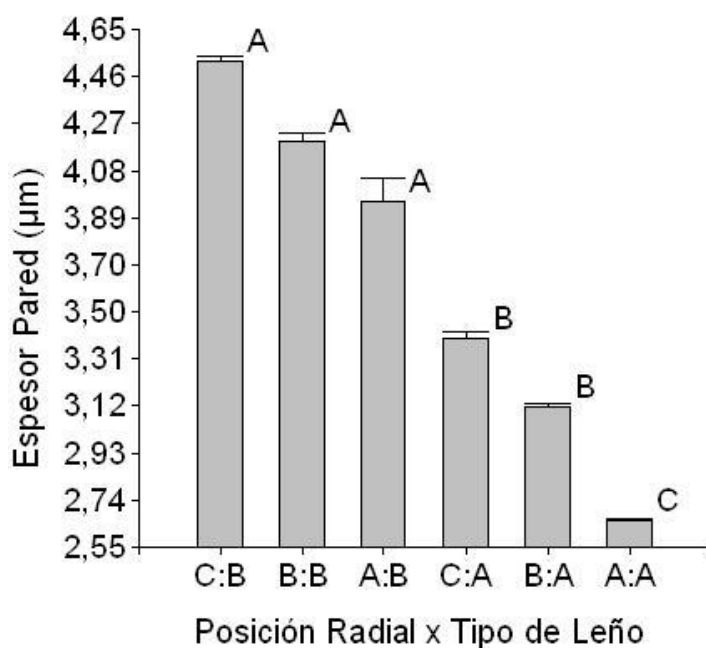


Figura 4.4: Interacción entre posición radial y tipo de leño para espesor de pared celular.

### 4.3.3 Longitud de traqueidas

La intensidad de raleo provocó una alteración en la longitud de traqueidas, pero sin marcar una tendencia clara y sistemática positiva o negativa en función al espacio vital asignado para cada árbol debido al tratamiento aplicado. Aunque los tratamientos T0 (3232  $\mu\text{m}$ ), T1 (3447  $\mu\text{m}$ ) y T2 (3388  $\mu\text{m}$ ) alcanzaron longitudes estadísticamente iguales. El tratamiento con 87,5% de raleo presentó mayor longitud de traqueidas (3756  $\mu\text{m}$ ), un 11% respecto a la media de los tratamientos T0, T1 y T2. Jordan *et al.* (34) indican que el crecimiento lento podría producir una fibra de estructura más compacta, lo que podría explicar el menor valor encontrado longitud de traqueidas de los T0, T1 y T2.

La mayor longitud de traqueidas del tratamiento con 87,5% de raleo, probablemente se deba a la mayor proporción de copa viva, dada que la longitud de traqueidas está ligada a la proporción de brotes vivos, además árboles dominantes presentan mayor longitud de traqueidas que árboles suprimidos (37), en este caso los tratamientos que tuvieron raleos más fuerte crecieron en condiciones más favorables, con un mayor crecimiento radial del árbol y con mayor longitud de copa verde. También Trevisan *et al.* (38) determinaron que árboles dominantes de *Eucalyptus grandis* presentaron mayor longitud de fibras (4,2%) que los árboles medios. Estos mismos autores (38) establecieron que la intensidad de raleo provoca alteraciones poca claras en la longitud de fibras, con raleos más intensos, para el caso de árboles dominantes encontraron un aumento en la longitud fibra, sin embargo para los árboles del estrato medio, comprobaron una disminución.

La variación radial de la longitud de traqueidas fue ascendente para los 4 tratamientos, con valores medios de 2966  $\mu\text{m}$ , 3471  $\mu\text{m}$  y 3992  $\mu\text{m}$  para las posiciones radiales A, B y C respectivamente (figura 4.5). El incremento en la longitud de traqueidas de la posición radial A a B y de A a C significó un 15% y 26% respectivamente. El incremento de B a C fue de 11%, esto podría considerarse una leve tendencia a la estabilización de la longitud de las traqueidas, característica de la madera madura.

En la figura 4.5 se muestra la variación en la longitud de traqueidas en función de la intensidad de raleo y la posición radial.

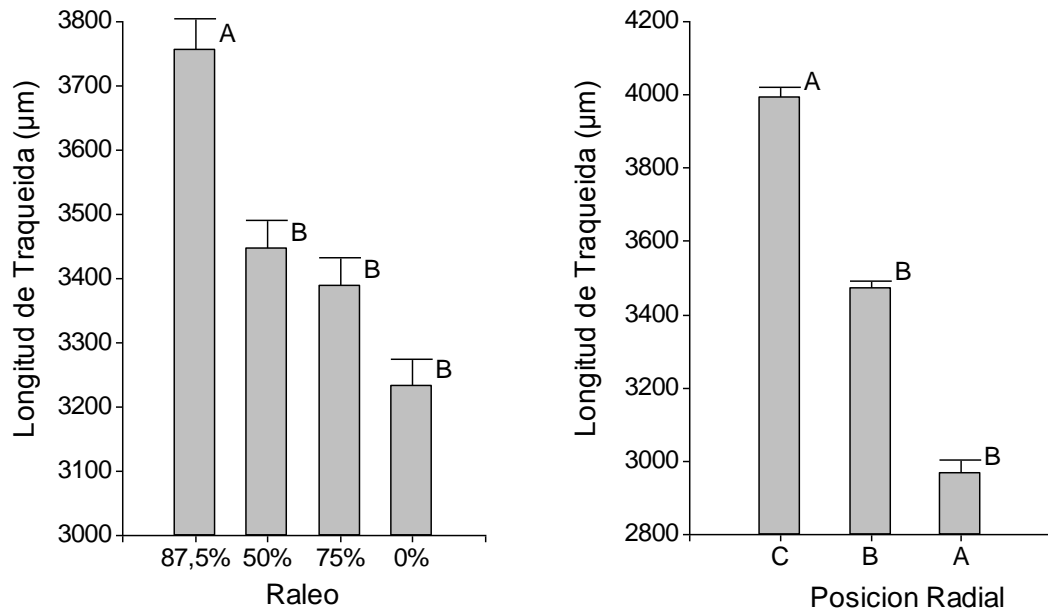


Figura 4.5: Longitud de traqueidas en función de la intensidad de raleo y la posición radial.

El valor promedio de la longitud de traqueidas determinado en este trabajo para la madera interna (posición radial A y B) y externa (posición radial C) fue de 3218 µm y 3992 µm respectivamente, fueron similares a las encontradas por Bolzón (64) (madera juvenil: 3415 µm, madera madura 4002 µm) para esta misma especie a los 30 años de edad, pero más cortas que las longitudes hallada por Ballarín y Palma (63) a los 37 años de edad (madera juvenil: 4200 µm, madura 5322 µm). Esta diferencia se debe probablemente a la edad.

El leño tardío presentó traqueidas 34% más larga (4257 µm) que las traqueidas del leño temprano (2797 µm).

Respecto a las interacciones, intensidad de raleo por posición radial fueron significativas ( $p$ -valor= 0,0001). Existen dos grupos de medias homogéneas, pero el grupo que menor longitud de traqueidas estuvo compuesto por la posición radial A de los tratamientos T0, T1 T2.

En las interacciones evaluadas para intensidad y raleo por tipo de leño, no fueron significativas ( $p$ -valor=0,0518). El leño tardío presentó mayor longitud para los 4 tratamientos, y para ambos tipos de leño, temprano y tardío los tratamientos que alcanzaron mayor longitud de traqueidas fueron  $T3>T1>T2>T0$ .

Las traqueidas del leño tardío son más largas que las del leño temprano para las 3 posiciones radiales. Las traqueidas del leño temprano de la posición radial A son 47% más cortas que las traqueidas del leño tardío para la misma posición radial. Esto indica que la variación debida al tipo de leño es mayor que la variación debida a la posición radial de la muestra.

Se encontraron interacciones significativas entre los factores posición radial y tipo de leño ( $p$ -valor= 0,0001). En la tabla 4.6 se muestra la interacción, posición radial por tipo de leño para la longitud de traqueidas.

Tabla 4.6: Variación de la longitud de traqueidas para la posición radial por tipo de leño.

Posición radial	Tipo de leño	Long media traqueidas ( $\mu\text{m}$ )	Grupo
C	B	4715	A
A	B	4056	A
B	B	4033	A
C	A	3379	B
B	A	2987	B
A	A	2168	C

La variación radial en las características de los elementos anatómicos (espesor de pared celular, longitud de traqueidas y ángulo microfibrilar), según señala la literatura, se debe a la presencia de una zona de madera juvenil cercana a la médula, la misma presenta entre otras características, traqueidas más cortas, paredes celulares más delgadas y mayor ángulo microfibrilar en la capa S2, lo que repercute directamente en la calidad de la madera.

#### 4.3.4 Porcentaje de leño tardío

El porcentaje de leño tardío disminuyó con el aumento de la intensidad de raleo. El T0 presentó mayor porcentaje de leño tardío (54%) y disminuyó a 53% en los tratamientos T1 y T2 y 52% en el T3.

El estrato suprimido de los tratamientos con 0% y 75% de raleo presentaron mayor porcentaje de leño tardío, 55% y 54 % respectivamente, y fueron estadísticamente iguales entre sí. Para los demás estratos, y para todos los tratamientos, el porcentaje de leño tardío fue estadísticamente igual.

En la figura 4.6 se muestra como varió el porcentaje de leño tardío por tratamiento de raleo.

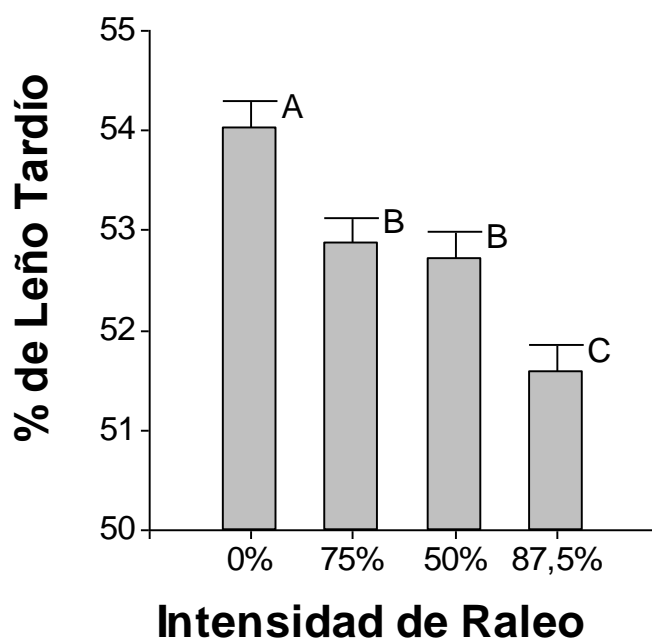


Figura 4.6: Porcentaje de leño tardío por tratamiento de raleo.

#### 4.3.5 Densidad básica a 1,30 m de altura

La densidad básica a 1,30 metros de altura fue mayor en el T0 (0,430 gr/cm<sup>3</sup>) y T1 (0,419 gr/cm<sup>3</sup>), que fueron estadísticamente iguales entre sí, y superiores al T2 (0,412 gr/cm<sup>3</sup>) y T3 (0,405 gr/cm<sup>3</sup>) para el 95% de

probabilidad, la tendencia fue decreciente con el aumento de intensidad de raleo.

Los valores de la DB de la posición radial A ( $0,371 \text{ gr/cm}^3$ ) y B ( $0,386 \text{ gr/cm}^3$ ) son iguales entre sí, sin embargo para la posición cercana a la corteza fue significativamente superior ( $0,492 \text{ gr/cm}^3$ ), representando un incremento de 24% de la posición radial A a C. Incrementos similares en el sentido radial fue determinado por Ballarín y Palma (63), indicaron que la madera madura (cercana a la corteza) presentó una densidad de un 26% mayor que en la madera cercana a médula (madera juvenil).

En la figura 4.7 se muestra la variación de la densidad básica a 1,30 m según la intensidad de raleo y la posición radial.

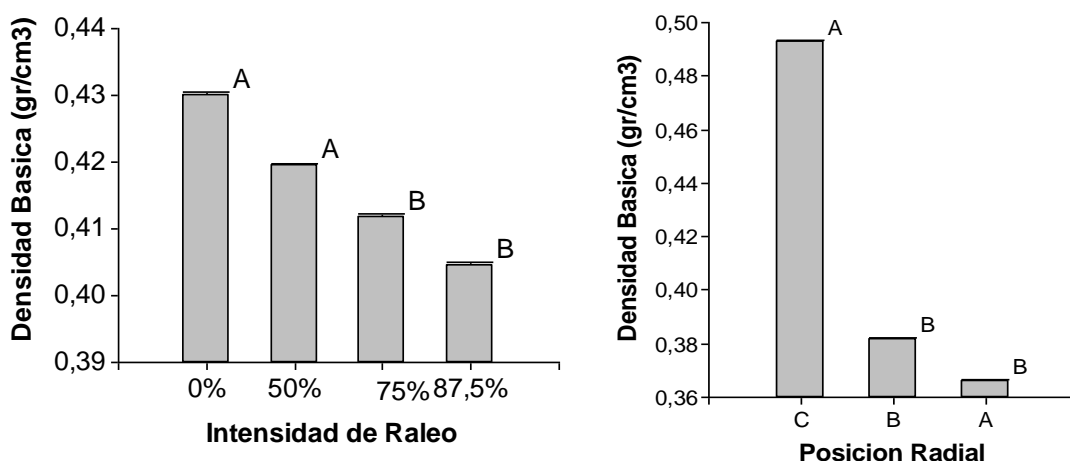


Figura 4.7: Variación de la densidad básica ( $\text{gr/cm}^3$ ) a 1,30 m según la intensidad de raleo y la posición radial.

Este patrón es comparable con otros estudios (5), (64), (66), (67) y (68).

Winck, *et al.* (58) determinaron para *Pinus taeda* de 15 años de edad proveniente de un sistema silvopastoril, que la densidad básica aumentó un 26% de médula a corteza, con valores de  $0,31 \text{ gr/cm}^3$  a  $0,42 \text{ gr/cm}^3$  respectivamente.

No hubo interacción entre la intensidad de raleo y la posición radial para la densidad media a 1,30 m de altura.

La posición radial B abarcó como máximo, al anillo 9, por lo tanto la baja densidad estaría indicando que a los 9 años de edad, la madera aún está constituida totalmente por leño juvenil.

#### 4.3.6 Densidad básica media de la 2º troza

Se evaluó la influencia del raleo y de la posición radial de la muestra en densidad básica (BD) media de la 2º troza, los resultados marcaron diferencias estadísticamente significativas para las intensidades de raleo y posición radial.

En la figura 4.8 podemos observar gráficamente como variaron las medias por tratamiento y posición radial.

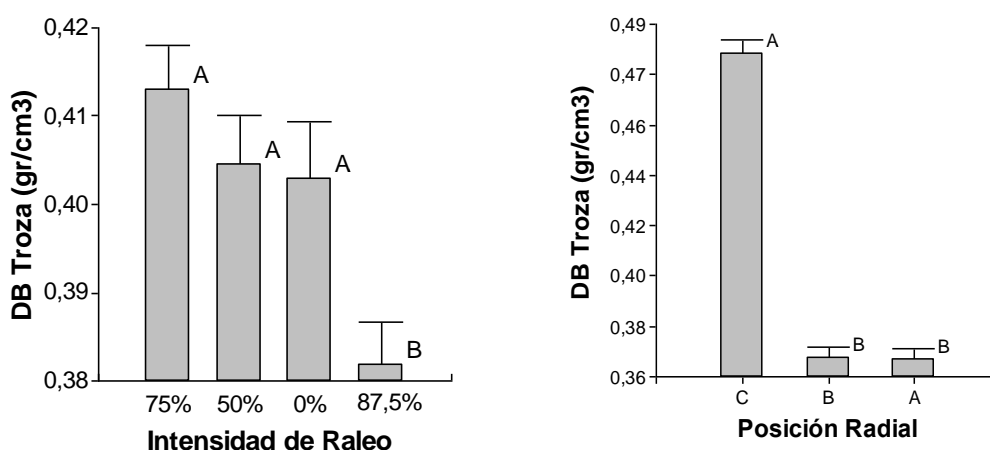


Figura 4.8: Variación de la densidad básica de la troza ( $\text{gr/cm}^3$ ) según la intensidad de raleo y la posición radial.

Los valores de DB para la troza de 2,80 m para los tratamientos T0 ( $0,405 \text{ gr/cm}^3$ ), T1 ( $0,407 \text{ gr/cm}^3$ ) y T2 ( $0,416 \text{ gr/cm}^3$ ) fueron estadísticamente iguales, para el T3 ( $0,383 \text{ gr/cm}^3$ ) la DB disminuyó significativamente. En el sentido radial aumentó. Aunque A y B ( $0,367 \text{ gr/cm}^3$ ) son estadísticamente iguales entre sí, pero diferente de C ( $0,482 \text{ gr/cm}^3$ ). La variación de la DB entre las 3 posiciones radiales evaluadas es independientemente del tratamiento aplicado. Para todos los



tratamientos el valor de densidad básica fue mayor en la posición radial C. Los valores medios determinado en este estudio están en los rangos descritos para la especie y son similares a los determinados por otros autores (5), (43), (64), (65), (66), (67) y (68).

No hubo interacciones entre intensidad de raleo y posición radial para la densidad básica media de la troza.

#### **4.3.7 Contracción e hinchamiento**

Como resultado para hinchamientos tangenciales, radiales y axiales se obtuvo como valores medios en porcentajes 6,59%, 3,46% y 0,44% respectivamente, con un hinchamiento volumétrico de 10,50%. Para contracciones tangenciales, radiales y axiales se obtuvo como valores medios en porcentajes 6,18%, 3,33% y 0,44 respectivamente, con una contracción volumétrica de 9,95%.

El hinchamiento de la madera es superior a la contracción debido a que el hinchamiento se calcula en base al volumen seco y la contracción en base al volumen húmedo, pero son muy semejantes, por ello con el análisis de una de estas propiedades es suficiente.

Como la madera es anisotrópica, se comporta en forma diferente en los tres planos tangencial, radial y axial, por ello se determinó la contracción en los tres planos y para cada tratamiento.

La intensidad de raleo influyó estadísticamente en la contracción axial, radial, tangencial y volumétrica. La contracción axial aumenta con la intensidad de raleo; comportamiento esperable debido al mayor porcentaje de leño temprano. El T3 presentó mayor contracción axial (0,53%). Para los demás tratamientos las contracciones axiales fueron de 0,33%, 0,43% y 0,47% para el T0, T1 y T2 respectivamente. La contracción radial fue mayor en T0 (3,71%) y en el T2 (3,56%) y menor en el T3 (2,94%) y T1 (3,12%).

El tratamiento sin raleo presentó mayor contracción tangencial y volumétrica, con 6,7% y 10,7% respectivamente, asociado probablemente a la mayor proporción leño tardío y al mayor espesor de pared celular.

En la tabla 4.7 se presentan los valores medios de contracción volumétrica, tangencial, radial y axial, coeficiente medio de contracción, anisotropía y punto de saturación de fibras.

Tabla 4.7: Valores medios de contracción volumétrica, tangencial, radial y axial, coeficiente medio de contracción, anisotropía y punto de saturación de fibras.

Int. Raleo	Cont. Vol. (%)	Cont. Tg. (%)	Cont. Rd. (%)	Cont. Ax. (%)	Coef. Medio Cont.	Anisotropía	PSF (%)
0,0%	10,70A	6,66A	3,71A	0,33A	0,14	1,68	24,16
50,0%	9,85B	6,29B	3,12B	0,43B	0,13	2,07	23,30
75,0%	10,05B	6,01B	3,56A	0,47B	0,14	1,77	23,66
87,5%	9,20B	5,74B	2,94B	0,53B	0,13	2,20	23,95
<b>Media</b>	<b>9,95</b>	<b>6,18</b>	<b>3,33</b>	<b>0,44</b>	<b>0,14</b>	<b>1,93</b>	<b>23,77</b>

Cont.=contracción, Vol.=volumétrica, Tg=tangencial, Rd=radial, Ax.=axial, Coef.=coeficiente.

Letras diferentes indican diferencias estadística al 95 % de probabilidad.

El valor medio de anisotropía fue de 1,93, por tanto la madera es considerada como de trabajabilidad normal.

El T1 y el T3 presentaron menor contracción radial, y como la anisotropía es la relación entre la CTg/CRd, estos 2 tratamientos mostraron el mayor coeficiente de anisotropía.

El coeficiente de contracción medio (del estado estacionado al anhidro) fue de 0,14.

El valor de punto de saturación de fibras fue de 23,77%, se encuentra entre el rango de porcentajes esperados para los pinos.

Estos valores concuerdan con los valores esperados para la especie.

La contracción volumétrica media para las muestras externas fue estadísticamente superior a la contracción de las muestras interna (tabla 4.8-

figura 4.9), esto se debe a que las traqueidas de la madera externa presentan mayor espesor de pared celular que la madera más cercana a la médula, por lo que la capacidad de perder y absorber agua es mayor, además cabe destacar que este fenómeno (variación en las dimensiones) ocurre solamente cuando la humedad de la madera es menor al punto de saturación de fibras.

Tabla 4.8: Contracción volumétrica según la posición de la muestra

Int. Raleo	Muestras Externas	Muestras Internas
0%	11,90A	9,51B
50%	10,90A	8,80B
75%	10,77A	9,32B
87,5%	9,69B	8,71B
<b>Media</b>	<b>10,82</b>	<b>9,09</b>

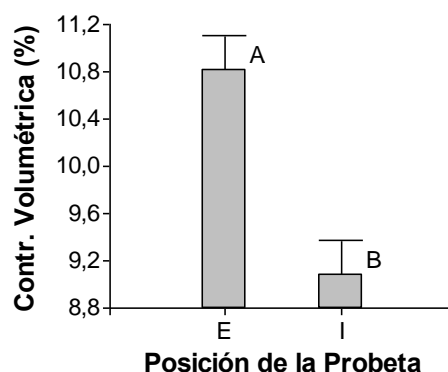


Figura 4.9: Contracción volumétrica según la posición de la probeta.

No hubo interacciones entre los factores: intensidad de raleo y posición de la probeta para las variables contracción axial, radial, tangencial y volumétrica.

#### 4.3.8 Humedad

El contenido medio de humedad de las muestras ensayadas mecánicamente fue del 11,28%, se registraron muestras con un mínimo de 8,7% y máximo de 15,1%, con un coeficiente de variación de 12,36%.

#### 4.3.9 Resistencia a la flexión estática

Los valores medios de módulo de elasticidad a la flexión fueron de 9688, 9948, 9145 y 7795 MPa para los tratamientos de 0%, 50%, 75% y 87,5% de raleo respectivamente. Los valores medios de módulo de rotura registrados fueron de 79,8; 79,6; 77,9 y 69,2 MPa para los tratamientos con 0%, 50%, 75% y 87,5% de raleo respectivamente. Los resultados indican que los MOE y MOR para el T0, T1 y T2 son estadísticamente iguales (figura 4.10).

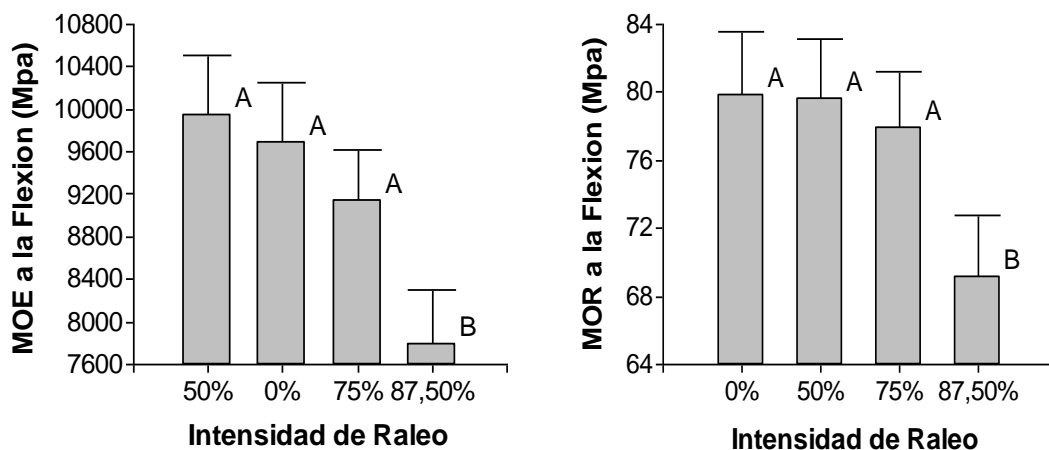


Figura 4.10: Modulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática para los 4 tratamientos de raleo.

Las propiedades de resistencia a la flexión se vieron afectadas en el tratamiento con 87,5% de raleo. Los valores medios de MOE y MOR del T3 disminuyeron un 19% y 13% respectivamente comparado a la media del T0, T1 y T2.

Los valores medios de resistencia a la flexión estática, de modo general (teniendo en cuenta las edades), fueron similares a los determinados por otros autores para esta misma especie (tabla 4.9).

Tabla 4.9: Valores de MOE y MOR determinado por otros autores

Edad (años)	Lugar	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Autor
37	Brasil	13.812	107.33	(63)
30	Brasil	12.438	79,00	(64)
21	Misiones	9.077	71,29	(91)
18	Brasil	10.700	75,50	(92)
13 y 14	Misiones	6.778	77,60	(93)
14	Misiones	3.926	54,71	(94)
6		1.256	26,14	
9	Misiones	4.607	41,77	(95)
16		8.990	61,36	

Los valores medios de MOE son de 11392 y 7276 MPa para las probetas externas e internas respectivamente. Los valores medios de MOR son de 96 y 61 MPa para probetas externa e internas respectivamente. Se determinó que las muestras externas (madera lateral) de todos los tratamientos son superiores en un 36% en sus propiedades de resistencias a la flexión (figura 4.11). Sin embargo estos porcentajes mejoran con la edad de la plantación. Ballarín y Palma (63) determinaron que para *Pinus taeda* de 37 años las propiedades resistencias fueron muy superiores en la madera madura en relación a la madera juvenil, superando en un 54% y 47% los valores de MOE y MOR respectivamente.

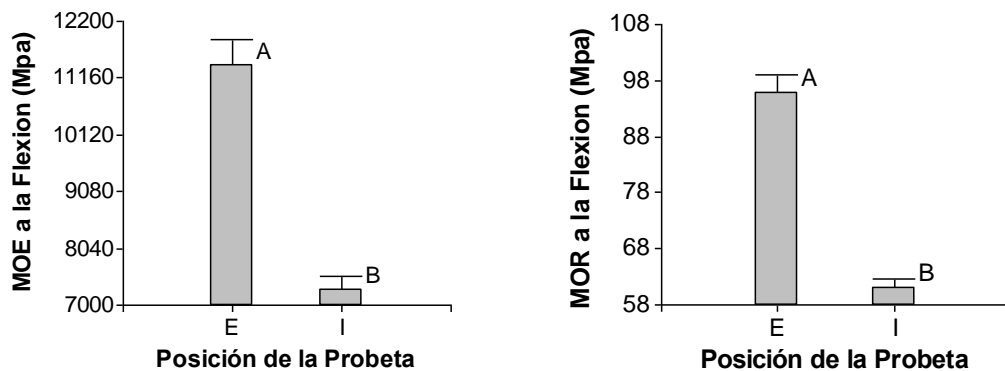


Figura 4.11: Módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática de muestras externas e interna.

La interacción entre intensidad de raleo por posición de la probeta fueron significativas ( $p$ -valor=0,03) para el MOE (figura 4.12a), pero no para el MOR ( $p$ -valor=0,08) a la flexión estática (figura 4.12b). Si bien en las probetas externas las propiedades de resistencia a la flexión son muy superiores a las de las probetas internas para todos los tratamientos, en el tratamiento de 50% de raleo el valor del MOE para ambas posiciones son muy similares (figura 4.12a).

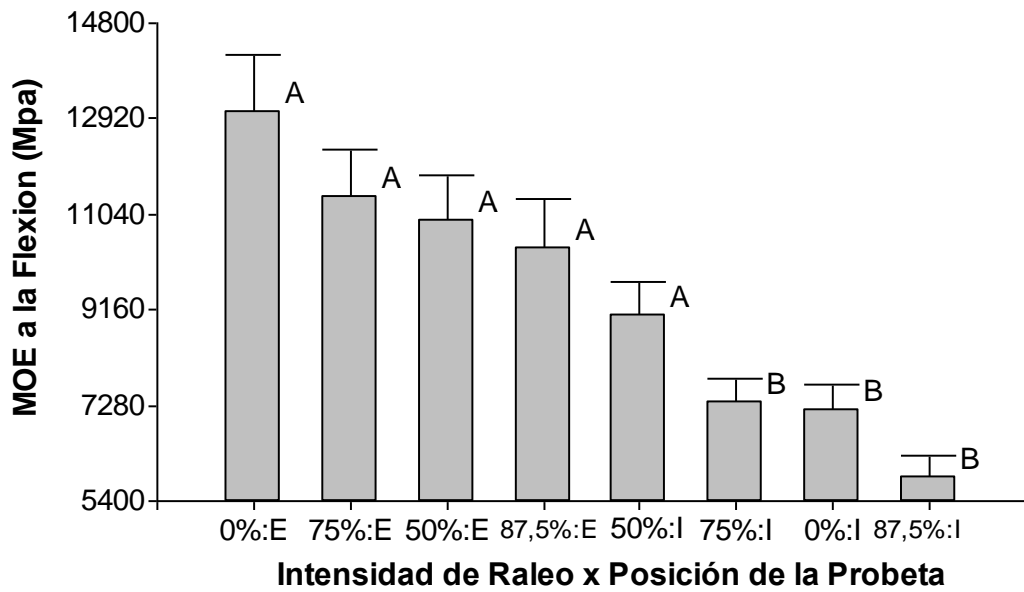


Figura 4.12.a): Módulo de elasticidad a la flexión para intensidad de raleo por posición de la probeta.

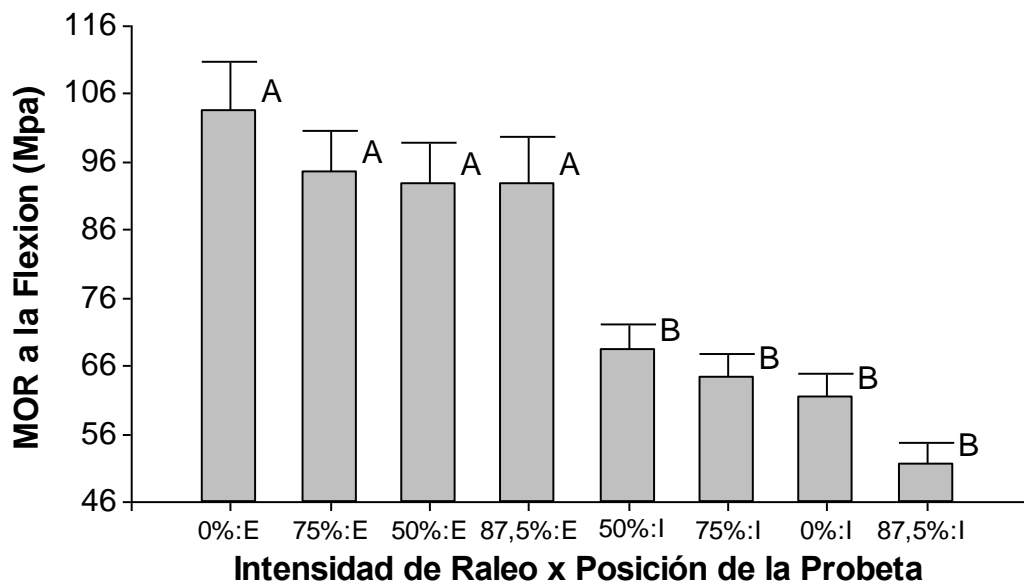


Figura 4.12.b): Módulo de rotura a la flexión para intensidad de raleo por posición de la probeta.

#### 4.3.10. Resistencia a la compresión paralela a las fibras

Los tratamientos con 0% y 50% de raleo presentaron mayores valores de módulo de elasticidad y de rotura a la compresión paralela a las fibras. Con valores medios de MOE 1787 y 1817 MPa para 0% y 50% de raleo respectivamente. Los tratamientos con 75% y 87,5% de raleo presentaron valores de MOE igual a 1579 y 1481 MPa respectivamente. Para el MOR el comportamiento fue similar: se registraron los siguientes valores medios 41, 43, 36 y 35 MPa para los tratamientos de 0%, 50%, 75% y 87,5% respectivamente. Para intensidad de raleo igual y superior al 75% de la densidad original los valores de resistencia a la compresión disminuyeron (figura 4.13).

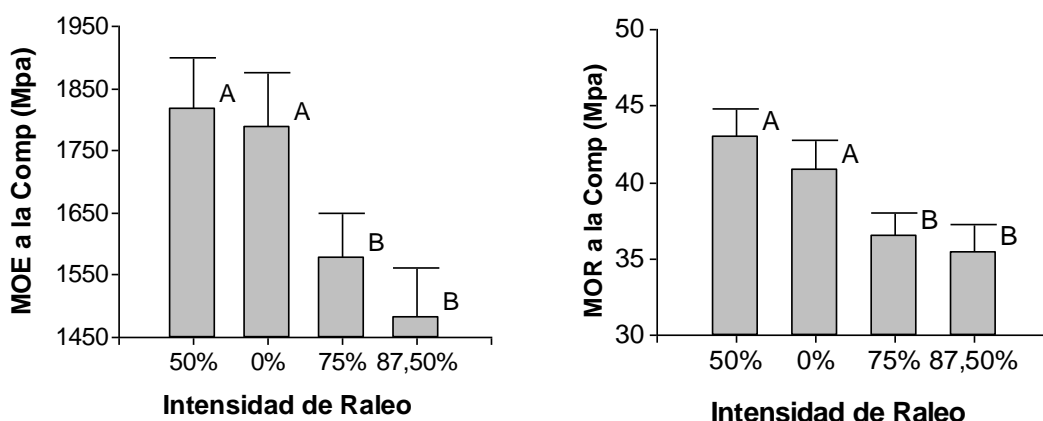


Figura 4.13: Modulo de elasticidad y de rotura a la compresión paralela a las fibras para los 4 tratamientos de raleo.

Los valores de MOE y MOR a la compresión del T2 y T3 disminuyeron en promedio un 15% y 14% respectivamente en comparación a los valores medios del T0 y T1.

Los valores medios de MOR a la compresión, fueron similares a los reportados por otros autores (64), (94) y (95) para esta misma especie. Sin embargo, el valor de MOE a la compresión es inferior a la encontrada por los mismos autores. Esto puede deberse al tratamiento aplicado. Debido a la menor cantidad de árboles por hectárea, el crecimiento en diámetro fue superior en estos 2 tratamientos.

Además, el esfuerzo es aplicado de manera paralela a fibra y por esta razón la presencia de leño temprano influye sobre la resistencia de la madera.

Se cuantificó las propiedades de resistencia de la madera interna y externa. Los resultados indican que la madera lateral es en promedio un 34% más resistente a la compresión que la madera interna, la tabla 4.10 muestra los valores medios para las probetas externa e interna.

Tabla 4.10: Valores medios de resistencia a la compresión para probetas externas e internas.

Posición probeta	MOE a la compresión (MPa)	MOR a la compresión (MPa)
E	2047A	48A
I	1346B	32B

Letras diferentes indican diferencias estadística al 95 % de probabilidad.

Esto puede ser de interés para las industrias para definir el diámetro mínimo que deben tener los rollizos para minimizar las pérdidas generadas por este tipo de madera, no solo por la pérdida de material sino también por la merma en resistencia, sobre todo en rollos más finos, dado que cuando se tratan de diámetros pequeños gran parte de la madera lateral se pierde en los costaneros durante el proceso de aserrado.

La interacción entre intensidad de raleo x posición de la probeta no fueron significativas para la resistencia a la compresión, ( $p$ -valor=0,81 y 0,74 para el MOE y MOR respectivamente).

Los tratamientos con 0% y 50% de raleo, presentaron mayores valores de resistencia tanto para las probetas externas como internas.

Los tratamientos con 0% y 50% de raleo resultaron estadísticamente iguales tanto para la densidad básica a 1,30 m como para espesor de pared celular, longitud de traqueidas, ángulo microfibrilar, MOE y MOR a la compresión.

En los tratamientos con 75% y 87,5% de raleo, la densidad básica a 1,30 m y el espesor de pared celular fueron estadísticamente iguales.



Con el tratamiento de 87,5% de raleo de la densidad original se obtuvo mayor ángulo microfibrilar, menor espesor de pared, mayor contracción axial o longitudinal y menor densidad básica a 1,30 m y para la troza, también las propiedades mecánicas evaluadas presentaron menores resistencias para este tratamiento.

#### 4.4 Asociación entre variables

La tabla 4.11 muestra la asociación entre variables dasométricas del árbol y las propiedades anatómicas de la madera. Se presentan los valores de los coeficientes de correlación y de probabilidad.

Tabla 4.11: Matriz de correlaciones de Pearson/probabilidad para variables dasométricas y caracteres anatómicos.

		p-valores									
		Árbol	dap	h	dap/h	hbcv	lcv	dbcv	esp	long	AMF
Coeficiente de correlación	Árbol		0,000	0,062	0,000	0,017	0,000	0,000	0,433	0,030	0,285
	dap	0,80		0,000	0,000	0,609	0,000	0,000	0,834	0,007	0,078
	h	0,39	0,74		0,030	0,043	0,014	0,000	0,742	0,047	0,012
	dap/h	0,84	0,93	0,44		0,072	0,000	0,000	0,967	0,009	0,261
	hbcv	-0,48	-0,11	0,42	-0,37		0,003	0,250	0,502	0,403	0,670
	lcv	0,80	0,76	0,50	0,75	-0,58		0,000	0,347	0,007	0,083
	dbcv	0,81	0,96	0,67	0,91	-0,24	0,83		0,581	0,010	0,062
	esp	-0,17	-0,05	-0,07	-0,01	0,14	-0,20	-0,12		0,798	0,605
	long	0,44	0,54	0,41	0,52	-0,18	0,54	0,51	0,06		0,145
	AMF	-0,23	-0,37	-0,50	-0,24	-0,09	-0,36	-0,39	0,11	-0,31	

Donde, dap=diámetro, h=altura, dap/h=relación diámetro altura, hbcv= altura hasta la base de copa viva, lcv= longitud de copa viva, dbcv= diámetro en la base de la copa viva, esp=espesor de pared celular, long=longitud de traqueidas, AMF=ángulo microfibrilar.

No se encontró correlación para el espesor de pared con ninguna variable dasométrica. Sin embargo las asociaciones para la longitud de traqueidas con el árbol y las variables del mismo fueron positivas, significativas (p-valor=0,05) y altamente significativas (p-valor=0,01). No hubo relación

alguna con la altura hasta la base de copa viva, con el espesor de pared y con el ángulo microfibrilar.

La longitud de traqueidas está moderadamente relacionada al árbol ( $r=0,44$ ), esto indica que la variabilidad en la longitud de las traqueidas entre árbol y árbol es aproximadamente 44%, también se asocia a las variables dasométricas del mismo, en ejemplares más grandes, con mayores diámetros a la altura de pecho, diámetro en la base de la copa, altura y longitud de copa viva, la longitud de traqueidas también van a ser mayores que en árboles más pequeños. Asimismo otros autores, indicaron que esta variable está relacionada al tamaño del árbol y a la parte viva del mismo, especialmente a la longitud de copa verde (37), lo que coincide con lo determinado en este estudio.

Trevisan *et al.* (38) y Rocha *et al.* (96) encontraron que la longitud de traqueidas de árboles dominantes es alrededor de 4 y 5% más elevada que en árboles intermedios. También Bergqvist *et al.* (97) encontraron que la longitud de traqueidas de abeto rojo de los árboles suprimidos fue menor.

Según Zobel *et al.* (98) y Van Buijtenen (99) la longitud de traqueidas se correlaciona con la longitud de brotes, por ello los árboles suprimidos al tener menor longitud de copa que los árboles dominantes, presentan menor longitud de traqueidas.

Por otro lado, Larson *et al.* (41) afirman que los valores reportados en la literatura para longitudes de traqueidas dentro y entre árboles de *Pinus taeda* son extremadamente variables. Indicaron además que la longitud aumenta abruptamente en la madera de primavera.

Para este estudio el tratamiento de 87,5% de raleo donde los árboles presentaban mayor diámetro medio respecto a los otros tratamientos presentó traqueidas un 11% más largas.

El ángulo microfibrilar mostró una asociación negativa y significativa con la altura del árbol, indicando que el AMF disminuye con la de altura del árbol, esta tendencia también fue reportada por Yin, *et al.* (24a).

También se analizaron las relaciones entre las variables internas y externas de la madera y se encontraron algunas asociaciones entre ellas (tabla 4.12).

Tabla 4.12: Matriz de correlaciones de Pearson/probabilidad para distintas propiedades de la madera

		p-valores											
		Árbol	DB	DB T	Esp	Long	AMF	LT	MOE-F	MOR-F	MOE-C	MOR-C	CVol
Coeficiente de correlación	Árbol		0,60	0,63	0,43	0,03	0,28	0,00	0,21	0,05	0,75	0,66	0,78
	DB	-0,11		0,00	0,49	0,46	0,02	0,64	0,50	0,25	0,05	0,04	0,07
	DB T	0,10	0,58		0,81	0,28	0,01	0,98	0,13	0,03	0,06	0,09	0,63
	Esp	-0,17	0,15	0,05		0,80	0,61	0,51	0,23	0,32	0,25	0,57	0,77
	Long	0,44	0,16	-0,23	0,06		0,15	0,00	0,13	0,09	0,28	0,11	0,96
	AMF	-0,23	-0,47	-0,51	0,11	-0,31		0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,76
	LT	-0,68	-0,10	0,00	0,14	-0,64	0,55		0,03	0,01	0,64	0,29	0,84
	MOE-F	0,27	0,15	0,32	0,26	0,32	-0,46	-0,45		0,00	0,00	0,00	0,00
	MOR-F	0,41	0,24	0,45	0,21	0,35	-0,46	-0,51	0,93		0,00	0,00	0,02
	MOE-C	-0,07	0,40	0,38	0,24	0,23	-0,53	-0,10	0,58	0,60		0,00	0,27
	MOR-C	0,10	0,43	0,36	0,12	0,33	-0,55	-0,22	0,66	0,69	0,90		0,25
	CVol	-0,06	-0,37	-0,10	0,06	-0,01	0,07	-0,04	0,58	0,49	0,24	0,24	

El porcentaje de leño tardío está altamente relacionado al árbol, pues este disminuye, cuando existe un rápido crecimiento radial del árbol. También estos ejemplares presentarán una mayor contracción longitudinal, coincidiendo con lo determinado por Palma y Ballarín (55).

La densidad básica a 1,30 m de altura mostró asociación significativa y positiva con densidad básica de la troza y con la resistencia a la compresión. Y una correlación significativa ( $p$ -valor=0,02) y negativa respecto al ángulo microfibrilar ( $r=-0,47$ ), pero esta relación fue superior cuando se tuvo en cuenta la densidad media de la troza y el AMF ( $r=-0,51$ ): Sin embargo Winck *et al.* (43) encontraron una correlación levemente superior ( $r=-0,57$ ) para la misma especie a los 15 años de edad.

Podemos afirmar que un aumento en la densidad provoca una disminución en el ángulo microfibrilar que puede variar entre el 47% y 51%. Resultados similares fueron encontrados para otras especies (23). Sin embargo Cown *et al.* (100), en un estudio donde evaluó el efecto del AMF y de la densidad básica sobre el módulo de elasticidad en tablas de *Pinus radiata* proveniente de clones, encontró una baja contribución del ángulo microfibrilar, en

comparación con otros factores como grano en espiral y la cantidad de nudo/por superficie. También Ivkovic *et al.* (101) afirmó que la correlación entre AMF y las propiedades de resistencias son más fuerte que con la densidad. Como así también Donaldson (11) indicó que la correlación entre la AMF y la densidad de la madera es variable.

Las correlaciones moderadas, determinadas para AMF con la densidad básica puede deberse al fenómeno que explicó Yin *et al.* (24a) que consiste en que, el MFA varía mucho más en la madera juvenil que la DB, mientras ambos AMF y DB tienden a mostrar pequeñas variaciones en la madera madura. Además las variaciones de densidad ocurren principalmente en la madera madura.

Yin *et al.* (24a), obtuvieron para abeto una fuerte correlación ( $r^2 = 0,97$ ), entre el AMF y la DB en los primeros anillos de crecimiento, sin embargo las correlaciones no fueron significativas, cuando tuvieron en cuenta todos los anillos desde la médula a la corteza. Concluyeron que el AMF tiene una relación lineal negativa significativa con BD en anillos de crecimiento, aunque no se correlaciona con BD de todo el sector radial desde la medula a la corteza. Esto ocurre debido a la gran variación del AMF y la pequeña variación de la DB en la región de la madera juvenil y las pequeñas variaciones de ambos MFA y BD en madera madura.

Algunos estudios han demostrado una correlación importante entre la AMF y la densidad de la madera, mientras que otros estudios no encontraron una correlación (102).

Yin *et al.* (24a) determinaron una correlación más elevada, curvilínea y negativa entre AMF y las propiedades mecánicas de resistencia, con valores de  $r^2$  de 0,88, 0,69 y 0,74 de MOE y MOR a la flexión y compresión paralela a las fibras respectivamente. Bendtsen y Senft (6) encontraron, para *Pinus taeda* buenas correlaciones entre AMF y MOR. La correlación entre AMF y la resistencia a la compresión es raramente investigada (11).

Jordan *et al.* (34) afirman que el MFA está altamente e inversamente correlacionada con la densidad básica, módulo de elasticidad, módulo de ruptura y la contracción tangencial, se correlaciona positivamente con la contracción longitudinal de la madera. Además, tiene una alta correlación con las propiedades: estiramiento, rigidez y resistencia del papel (5) (103), (104).

El AMF y las propiedades de resistencias presentaron en este estudio correlaciones negativas y moderadas, menores a los encontrado en la bibliografía. Los valores de  $r$  para el MOE fueron -0,46 y -0,53 y para MOR -0,46 y -0,55 para la flexión y la compresión respectivamente. Este resultado indica que el AMF puede explicar entre un 46% y 55% de la variación en las propiedades de resistencia del *Pinus taeda* de 20 años que recibieron diferentes tratamientos de raleo. A medida que el AMF disminuye, las propiedades de resistencias son mejoradas. Esto ya fue destacado por otros autores (102), (105) y (106). Donaldson (11) estableció que las propiedades de la pared celular secundaria (específicamente el ángulo microfibrilar) y el espesor de pared celular (densidad) ambos afectan las propiedades mecánicas de la madera.

En este caso, no se encontró correlación para el espesor de pared con las propiedades de la madera, ni para AMF con la contracción longitudinal, ni tangencial.

## 5. CONCLUSIONES

Las intensidades de raleo estudiadas produjeron variaciones significativas en las propiedades de la madera de *Pinus taeda*. El ángulo microfibrilar y la contracción longitudinal aumentaron, mientras que el espesor de pared y la densidad básica disminuyeron con la intensidad de raleo.

La aplicación de un raleo del 50% de la densidad original de la plantación favoreció la obtención de madera con propiedades superiores para todas las variables estudiadas.

El tratamiento con 87,5% de raleo afectó negativamente a las propiedades, generó un aumento en el ángulo microfibrilar, en la contracción longitudinal y una disminución en el espesor de pared, en la densidad básica, en el porcentaje de leño tardío y en los valores de resistencia a la flexión y a la compresión. Aunque la resistencia a la compresión, la densidad básica a 1,30 m y el espesor de pared disminuyeron significativamente para intensidades de raleo iguales y superiores al 75% de la densidad original.

El raleo provocó una alteración en la longitud de traqueidas, pero sin marcar una tendencia clara y sistemática positiva o negativa, en función al espacio vital asignado para cada árbol, debido al tratamiento aplicado, aunque en el tratamiento con mayor intensidad, las traqueidas fueron más largas.

La madera externa, independientemente del tratamiento de raleo aplicado, presentó valores de resistencia a la flexión y a la compresión muy superiores a los de la madera interna. También las muestras externas presentaron mayor contracción volumétrica independientemente de la intensidad de raleo, debido a la presencia de traqueidas con paredes celulares más gruesas que tienen mayor capacidad de absorber y perder agua.

El ángulo microfibrilar, disminuyó en el sentido radial, mientras que el espesor de pared, la longitud de traqueidas y la densidad básica a 1,30 m aumentaron en el sentido radial independientemente del tratamiento de raleo aplicado. Las propiedades de la madera mejoraron sustancialmente de la médula a la corteza.

La madera de leño tardío presentó mayor longitud de traqueidas, mayor espesor de pared y menor ángulo microfibrilar que la madera de leño temprano.

La contracción volumétrica para *Pinus taeda* de 20 años, fue mayor en el tratamiento sin raleo que presentó mayor proporción de leño tardío y mayor espesor de pared. Por el contrario, esta propiedad fue menor con el tratamiento de 87,5% de raleo, donde los valores medios de leño tardío y espesor de pared celular fueron menores.

La covariable diámetro a la altura de pecho fue significativa al 95% de probabilidad para la mayoría de las variables respuestas estudiadas. La variable árbol fue significativa para longitud de traqueidas, esto indica que existe gran variabilidad entre árboles para la longitud de traqueidas.

En la posición radial inmediatamente cerca de la médula y al 50% del radio, se registraron valores estadísticamente iguales para las variables densidad básica a 1,30 m y de la troza, el espesor de pared, la longitud de traqueidas y el ángulo microfibrilar, esto permite concluir que a los 9 años, el *Pinus taeda* aún está constituido totalmente por leño juvenil, dado que para la posición ubicada al 50% de la distancia del radio abarcó como máximo al noveno anillo de crecimiento.

## 6. REFERENCIAS

1. Brown, M.J.; Mc Williams, W.H.; “Pine stands across the South - trends and projections”, *In: Proceedings of the Southern Plantation Wood Quality Workshop; 1989; Athens*. Asheville: Southeastern Forest Experiment Station, United States Department of Agriculture. pp. 1-15. (1990).
2. Macdonald, E., and Hubert, J.; “A review of the effects of silviculture on timber quality of *Sitka spruce*”. *Forestry* 75 (2):107–138 (2002).
3. Walker, J.C.F. y Butterfield, B.G.; “The Importance of Microfibril Angle for the Processing Industries”. *New Zealand Forestry*. 4(4):34-40 (1995).
4. Donaldson, L.A.; “Effect of Physiological Age and Site on Microfibril Angle in *Pinus radiata*”. *IAWA Journal*. 17(4):421–429 (1996).
5. Megraw, R. A.; “Wood Quality Factors in Loblolly Pine”, The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle. *TAPPI PRESS*. Atlanta, GA. 88 pp. Printed in the United States of America. Copyright (1985).
6. Bendtsen, B.A.; and Senft, J.F.; “Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine”. *Wood and Fiber Science*. 18 (1): 23-38 (1986).
7. Du Toit, B., Smith, C., Carlson, C., Esprey, L., Allen, R., Little, K.; “*Eucalyptus* and Pine Plantations in South Africa”. In *Workshop Proceedings: Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests*. Pietermaritzburg, South Africa. CIFOR. Pp 23–30 (1998).
8. Simpson, J.A., Osborne, D.O.; Xu, Z.H. “Pine Plantations on the Coastal Lowlands of Subtropical Queensland, Australia”. In *Workshop Proceedings: Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests*. Pietermaritzburg, South Africa. CIFOR. Pp 61-68 (1998).
9. De Lungo, A., Ball, J. and Carle, J.; “Global planted forests thematic study: results and analysis”. *Planted Forests and Trees*. FAO. Working Paper 38. Rome (2006).
10. -----<http://www.swst.org/teach/teach1/structure1.pdf>



11. Donaldson, L.A.; "Microfibril angle: measurement, variation and Relationships – a review". *IAWA Journal*, Vol. 29 (4), 345–386 (2008).
12. Goring, D.A.I.; "The physical chemistry of lignin". *Pure Appl. Chem.* 5:233–254 (1962).
13. Treacy, M., Ní Dhubhain, A. & Evertsen, J.; "The influence of microfibril angle on modulus of elasticity and modulus of rupture in four provenances of Irish grown Sitka spruce (*Picea sitchensis*)". *J. Inst. Wood Sci.* 15: 211–220 (2000).
- 13.a. Treacy, M.; Evertsen, J. & Ní Dhubháin, A.; "A Comparison of Mechanical and Physical Wood Properties of a Range of Sitka Spruce Provenances". David Nevins. Chairman. COFORD. pp.35 (2000).
14. Jozsa, L.A. and Middleton, G.R.; "A discussion of wood quality attributes and their practical implications". Special publication No SP-34. Forintek Canada Corp. Vancouver. B.C., 42p. (1994).
15. Bailey, I.W. and Vestal, M.R.; "The Orientation of cellulose in the secondary wall of tracheary cells". *J. Arnold Arb* 18: 185-195 (1937).
16. Pillow, M.Y., Terrell, B.Z. and Hiller, C.H.; "Patterns of variation in fibril angles in loblolly pine". *USDA Forest Service FPL Report no. D1935.* (1953).
17. Cockrell, R. A.; "A comparison of latewood pits, fibril orientation and shrinkage of normal and compression wood of giant sequoia". *Wood Sci. Technol.* 8 (3): 197-206 (1974).
18. Senft, J.F.; Bendtsen, B.A.; "Measuring microfibrillar angles using light microscopy", *Wood and Fiber Science*, 17(4), pp. 564-567. (1985).
19. Donaldson, L.A.; "The use of pit apertures as windows to measure microfibril angle in chemical pulp fibres". *Wood Fibre Sci.* 23 (2): 290–295 (1991).
20. Huang, C.L.; "Revealing fibril angle in wood sections by ultrasonic treatment". *Wood Fibre Sci.* 27 (1): 49–54 (1995).
21. Huang, C.L.; Kutscha, N.P.; Leaf, G.J.; and Megraw, R.A.; "Comparison of microfibril angle measurement techniques". In: B.G. Butterfield (ed.),

- Microfibril angle in wood: 177–205. *IAWA and IUFRO*, Christchurch, New Zealand (1998).
22. Wang, H.H.; Drummond, J.G.; Reath, S.M.; Hunt, K.; Watson, P.A.; “An improved fibril angle measurement method for wood fibres”. *Wood Sci. Technol.* 34: 493–503 (2001).
  23. Yamashita, K., Hirakawa, Y., Fujisawa, Y. & Nakada, R.; “Effects of microfibril angle and density on variation of modulus of elasticity of Sugi (*Cryptomeria japonica*) logs among eighteen cultivars”. *Mokuzai Gakkaishi* 46: 510–522 (2000).
  24. Yin, Y., Bian, M., Song, K., Xiao, F. and Xiaomei, J.; “Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)”. *IAWA Journal*, 32(4):431–442 (2011).
  - 24.a. Yin, Y., Song, K., Liu, B. Jiang, X.; “Variation of microfibril angle in plantation trees of *Cunninghamia lanceolata* determined by pit apertures and x-ray diffraction”. *IAWA Journal*, 32 (1): 77–87 (2011).
  25. Mott, L., Groom, L. & Shaler, S.; “Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part II. Comparison of earlywood and latewood fibers with respect to tree height and juvenility”. *Wood Fiber Sci.* 34: 221–237 (2002).
  26. Meylan, B. A.; Probine, M.C.; “Microfibril angle as a parameter in timber quality assessment”. *Forest Products Journal*.19 (4): 30-33 (1969).
  27. Lima, J.T.; Breese, M. C.; Cahalan, C. M.; “Variation in microfibril angle in *Eucalyptus* clones”. *Holzforschung*, 58:160–166 (2004).
  28. Via, B.K.; So, C.L.; Shupe, T.F.; Groom, L.H.; Wikaira, J.; “Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position”. *Composites: Part A.* 40:60-66 (2009). <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/33751> (Consulta: 06 de septiembre de 2012).

29. Waghorn, M.; "Effect of initial stand spacing and breed on dynamic modulus of elasticity of *Pinus radiata*". Thesis mestrado. The New Zealand School of Forestry. University of Canterbury. 125 p (2006).
30. Färber, J., Lichtenegger, H. C., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S. y Fratzl, P.; "Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications". *Journal of Materials Science*, 36: 5087–5092 (2001).
31. Donaldson, L. A.; "Within and between tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*". *New Zealand Journal of Forestry Science*. 22(1):77–86 (1992).
32. Jiang, X.M., Yin, Y.F. Lu, J.X. & Hiroyuki, U.; "The influence of S2 microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in China-fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation woods". *Chinese Forestry Sci. Technol.* 1 (4): 1–7 (2002).
33. Fang, S.Z., Yang, W.Z. & Ye, T.; "Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones". *New Forests* 31: 373–383 (2006).
34. Jordan, L.; Hall, D. B.; Clark, A. III; Daniels, R. F.; "Variation in loblolly pine cross-sectional microfibril angle with tree height and physiographic region". *Wood and Fiber Science*, 38(3): 390-398 (2006).
35. Zhang, B., Fei, B.H., Yu, Y. & Zhao, R.J.; "Microfibril angle variability in Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) using X-ray diffraction". *Forestry Studies in China* 9: 33–38 (2007).
36. Addis, T., Buchanan, A.H. and Walker, J.C.F.; "A comparison of density and stiffness for predicting wood quality. Or Density: The lazy man's guide to wood quality". *J. Inst. Wood Sci.* 13(6):539–543 (1995).
37. Jyske, T.; "The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) – the results of long-term experiments. *Dissertationes Forestales* 55. Department of Forest Resource Management. Faculty of Agriculture and Forestry. University of Helsinki. 59 p. 2008. Disponible en <http://www.metla.fi/dissertationes/df55.htm> (Consulta Junio 2013).
38. Trevisan, R.; Souza, J.T.De; Denardi, L.; Haselein, C.R.; Santini, E.J.; "Efeito do desbaste no comprimento das fibras da madeira de Eucalyptus

- grandis W. Hill ex Maiden”. *Ciência Florestal*, Santa Maria. 23(2): 461-473 2013.
39. Saranpää, P.; Serimaa, R.; Andersson, S.; Pessonen, E.; Suni, T.; & Paakkari, T.; “Variation of microfibril angle Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – comparing X-ray diffraction and optical methods”. In: B.G. Butterfield (ed.), *Microfibril angle in wood*: 240–252 (1998).
  40. Herman, M.; Dutilleul, P. and Avella-Shaw, T. “Growth rate effects on intra-ring and inter-ring trajectories of microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*)”. *IAWA J.* 20: 3–21. (1999).
  41. Larson, P.R.; Kretschmann, D.E.; Clark, A III.; and Isebrands, J. G.; “Formation and properties of juvenile wood in southern pines: A synopsis”. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129. USDA, Forest Serv., Forest Prod. Lab, Madison, WI. 42 pp. (2001).
  42. Jones, P. D.; Schimleck, L.R.; Peter, G.F.; Daniels, R.F. and Clark, A. III.; “Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia”. *Can. J. For. Res.* 35: 85–92 (2005).
  43. Winck, R.A., Fassola, H.E., Tomazello, M.F., Area, M.C. Case study: “Microfibril angle and its relationship with basic density in *Pinus taeda* L. Wood from silvopastoral systems”. *O Papel.* 74 (5): 55–61 (2013).
  44. Schimleck, L.R.; Tyson, J.A.; Jones, P.D.; Peter, G.F.; Daniels, R.F. and Clark III, A.; “*Pinus taeda* L. wood property calibrations based on variable numbers of near infrared spectra per core and cores per plantation”. *Near Infrared Spectrosc.* 15: 261-268 (2007).
  45. Ying, L., Kretschmann, D.E. and Bendtsen, B.A.; “Longitudinal shrinkage in fast-grown loblolly pine plantation wood”. *Forest Prod. J.* 44(1):58–62 (1994).
  46. Isik, F.; Gumpertz, M.; Li, B.; Goldfarb, B. and Sun, X.; “Analysis of cellulose microfibril angle using a linear mixed model in *Pinus taeda* clones”. *Can. J. For. Res.* 38: 1676-1689 (2008).

47. Bendtsen, B. A.; "Properties of wood from improved and intensively managed trees". *Forest Products Journal* 28 (10):61-72 (1978).
48. Senft, J.F.; Bendtsen, B.A.; Galligan, W.L.; "Weak wood". *Journal of Forestry*. (83):476-485. (1985).
49. Burdon, R.D., Kibblewhite, R.P., Walker, J.C.F. & Megraw, R.A.; "Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*". *For. Sci.* 50: 399–415 (2004).
50. Kretschmann, D.E.; Cramer, S, M; "The role of earlywood and latewood properties on dimensional stability of loblolly pine", Proceedings of the compromised wood workshop. 2007 January 29-30; Christchurch, New Zealand: Wood Technology Research Centre, School of Forestry, University of Canterbury: 215-236 (2007).
51. Porta, M.G. y Fadrique, J.; "Madera Juvenil en *Pinus elliottii* (Engelm), Cultivado en Uruguay". Tesis de Grado. Facultad de Agronomía. Montevideo (2003).
52. López, J.A., 2005. Un nuevo desafío en especies de rápido crecimiento en el NE de la Argentina. *Madera de Calidad para Usos Sólidos*. Idia XXI. 175-279 (2005).
53. Gorisek, Z. and Torelli, N.; "Microfibril angle in juvenile, adult and compression wood of spruce and silver fir". Department of Wood Science and Technology. Vol. 39. Fasc. 3. P 129 - 132 (1999).
54. Jankowsky, I.P.; "Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial". Circular Técnica IPEF, Piracicaba, 81: 1-18 (1979).
55. Palma, H.A. e Ballarin, A.W.; "Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L". *Scientia Forestali* (64): 13-22 (2003).
56. Vidaurre, G., Lombardi, L.R., Oliveira, J.T. da S., Chaves Arantes, M.D.; "Lenho Juvenil e Adulto e as Propriedades da Madeira" *Floresta e Ambiente*. 18(4): 469-480 (2011). Disponible en: [http://www.floram.org/volumes/vol18%20n4-2011/Vol18\\_no4\\_469A480.pdf](http://www.floram.org/volumes/vol18%20n4-2011/Vol18_no4_469A480.pdf) (Acceso: 31 de mayo de 2012).

57. Cave, I.D.; "Anisotropic elasticity of the plant cell wall". Wood Science and Technology. 2 (4): 268-278 (1968).
58. Winck, R.A., Fassola, H.E., Tomazello, M.F.; Area, M.C.; "Caso de estudio: Angulo microfibrilar y su relación con la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. Con manejo silvopastoril". VII° Edición Congreso Iberoamericano de Investigación Celulosa y Papel. (2012).
59. Cown, D.J.; Young, G.D.; and Burdon, R.D.; "Variation in wood characteristics of 20 year old half sib families of *Pinus radiata*". New Zealand Journal of Forestry Science 22 (1): 63-76 (1992).
60. Lichtenegger, H.; Reiterer, A.; Tschegg, S. & Fratzl, P.; "Determination of spiral angles of elementary fibrils in the wood cell wall: comparison of small-angle X-ray scattering and wide-angle X-ray diffraction". In: B.G. Butterfield (ed.), Microfibril angle in wood: 140–156 (1998).
61. Andersson, S.; Serimaa, R.; Torkkeli, M., Paakkari, T.; Saranpää, P.; & Pesonen, E.; "Microfibril angle of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] compression wood: comparison of measuring techniques". J. Wood Sci. 46: 343–349 (2000).
62. Bonavia de Guth, E.; "Evaluación en laboratorio de la calidad papelera de seis especies de *Eucalyptus*". ATIPCA. 23(1): 55-59 (1984).
63. Ballarin, A.W. e Palma, H.A.L.; "Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.371-380 (2003).
64. Bolzon de Muñiz, G.; "Caracterización e desenvolvimento de modelos para estimar as propiedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliotti* Engelm. e *Pinus taeda* L." Tese doutoral em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil. 252 pp. (1993).
65. Barth, S. R.; Fassola, H. E.; Crechi, E.; Keller, A.E.; Winck, R. A.; Figueredo, E. I; Knebel O. E. "Densidad de la madera de *Pinus taeda* L. implantado en la zona Misiones – noreste Corrientes, Argentina, en sentido longitudinal y transversal". 15<sup>as</sup> Jornadas Técnicas Forestales y

- Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA (2012).
66. Pereyra, O. y Gelid, M.; “Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes”. *Revista Floresta* 33 (1) 3–19 (2002).
67. Weber, M.E.; “Densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. Marion de diferentes edades, Misiones, Argentina”. *Revista Floresta*. 35 (3): 487–494 (2005).
68. Von Wallis, A.; Martiarena, R.; Pinazo, M. A.; “Densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. Marion en función de la densidad arbórea del rodal y posición transversal en el fuste”. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales. IBEROMADERA. pp.9. Publicado en cd de actas (2007).
69. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture Handbook, 436, Washington, D.C. (1975).
70. INTA. “Atlas de Suelo de la República Argentina”. Provincia de Misiones, tomo II, 111-154 (1990).
71. Servicio Meteorológico Nacional. Datos Estadísticos. “Período 1981-1990. Ciudades de Iguazú y Posadas”. (2008). Disponible en: <http://www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=30&provincia=Misiones&ciudad=Posadas>;  
<http://www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=30&provincia=Misiones&ciudad=Iguazú> (Consulta: 09 de abril de 2012).
72. Köhl, M.; Magnussen, S.; Marchetti, M. Sampling Methods; Remote Sensing and GIS. Multiresource Forest Inventory. Ed. Springer. Berlin. Heidelberg. Serie Tropical Forestry. p. 17-69 (2006).
73. International Association of Wood Anatomy. “List of microscopic features for hardwood identification”. *IAWA Bulletin*, Utrecht, 10 (3) 219-332 (1989).
74. IRAM 9544. “Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas”. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 6p. (1973).

75. IRAM 9532. "Método de Determinación de Humedad". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 11p. (1973).
76. IRAM 9543. "Método de Determinación de las Contracciones Totales, Axial, Radial y Tangencial". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 4p. (1966).
77. DIN 52186 (Deutsch Industrie Norm); "Prüfung von Holz"; Biegeversuch. DIN-Taschenbuch 31, Beuth, Germany. (1978).
78. IRAM 9542. "Método de Ensayo de Flexión Estática de Maderas con Peso Específico Aparente Mayor de  $0,5 \text{ g/cm}^3$ ". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 6p. (1965).
79. Núñez, C. E. y Pavlik, C. A.; "Disgregado de tejidos Leñosos por el Método Clorito-Ácido Acético-Carbonato. Evaluación del daño producido a las fibras". Re. Cienc. Tecnol. Año. 2, 2:33–37 (1999).
80. Wilcox, C.D., Dove, S.B., McDavid, W.D. and Greer, D.B.; "UTHSCSA Image Tool". (2002). Disponible en: <http://compdent.uthscsa.edu/dig/itdesc.html> ( Acceso: Mayo 2012).
81. Barusso, A.P.; "A determinação de funções de crescimento mediante análise de tronco". Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba. 133p. (1977).
82. Finger, C.A.G.; "Fundamentos da Biometria Florestal". Santa Maria: Ed.UFSM. 269p. (1992).
83. Machado, S.A.; Silva, L.C.R.; Figura, M.A.; Téó, S.J.; Nascimento, R.G.M.; "Comparison of methods for estimating heights from completely stem analysis data for *Pinus taeda*". Ciência Florestal, Santa Maria. 20 (1): 45-56 (2010).
84. IRAM 9545. "Método de Ensayo de Flexión Estática". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 6p. (1985).
85. IRAM 9541. "Método de Ensayo de Compresión Axial de Maderas con Peso Específico Aparente Mayor de  $0,5 \text{ g/cm}^3$ ". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 3p. (1965).



86. DIN 52185 (Deutsch Industrie Norm); "Prüfung von Holz"; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. DIN-Taschenbuch 31, Beuth, Germany. (1976).
87. Balzarini, M.; Macchiavelli, R.E.; Casanoves, F.; "Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería". Apuntes Curso de Postgrado. 122p. (2013).
88. [http://xsgapeio.uvigo.es/descargas/Llorenc\\_Badiella\\_presentacion.pdf](http://xsgapeio.uvigo.es/descargas/Llorenc_Badiella_presentacion.pdf)
89. Di Rienzo, J.A.; Guzmán A.W.; Casanoves F. A.; "Multiple Comparisons Method based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree". Journal of Agricultural, Biological, and Environment Statistics, 7(2): 1–14 (2002).
90. Cave, I.D., and Walker, J.C.F. "Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: The influence of microfibril angle". Forest Prod. J. 44(5):43–48 (1994).
91. Sparnochia, L. "Estudio de las propiedades físico mecánicas de *Pinus elliotii*, *Pinus taeda* y *Pinus patula*". Jornadas sobre Pinos Subtropicales, 1992, Eldorado, Misiones. Argentina. Actas. Tomo II. Eldorado:CIEF, p. 247-252. (1992).
92. Tomaselli, I.; "Comparação da qualidade da madeira de *Araucaria angustifolia*, e *Pinus* spp produzida em reflorestamentos". In: IUFRO Meeting on Forestry problems of the Genus Araucaria, 1, 1979, Curitiba. Forestry problems of the genus Araucaria. Curitiba: FUPEF, p. 286-291. (1980).
93. González, R., Pereyra, O., Suirezs, T.; "Propiedades Físicas y Mecánicas del *Pinus taeda* reforestado en la provincia de Misiones". Argentina Yvyrareta, Eldorado, n. 4, p 4-8 (1993).
94. Suirezs, T.M.; "Efecto de la impregnación con CCA (cromo-cobre-arsénico) sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. Eldorado. Misiones". Tesis de Maestría. UNaM. pp. 76. (2000).

95. Weber, M.E.; “Caracterización física y mecánica de *Pinus taeda* origen marion en plantaciones de diferentes edades y determinación de usos potenciales, Misiones, Argentina”. Tesis Maestría. 143p (2005).
96. Rocha, F.T.; Florsheim, S.M.B.; Couto, H.T.Z. do.: “Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos”. Revista Instituto Florestal, São Paulo. 16 (1) 43-55 (2004).
97. Bergqvist, G., Bergsten, U. & Ahlqvist, B.; “Fibre properties of Norway spruce of different growth rates grown under birch shelterwoods of two densities”. Can. J. For. Res.30: 487–494 (2000).
98. Zobel, B.J. & Sprague, J.R.; Juvenile wood in forest trees. Springer series in wood science. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. 363p. (1998).
99. Van Buijtenen, J.P.; Wood variation– its causes and control. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. 363 p. (1989).
100. Cown, D.J., Ball, R.D. & Riddell, M.J.C.; “Wood density and microfibril angle in 10 *Pinus radiata* clones: distribution and influence on product performance”. NZ. J. For. Sci. 34:293–315 (2004).
101. Ivkovic, M., Gapare, W.J.; Abarquez, A.; Ilic, J.; Powell, M.B. & Wu, H.X.; “Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine”. Wood Sci. Technol. 43: 237–257 (2009).
102. Bergander, A. “Local variability in chemical and physical properties of spruce wood fibers”. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm. (2001).
103. Watson, A.J., and Dadswell, H.E.; “Influence of fibre morphology on paper properties. 4. Micellar spiral angle”. Appita 17:151–156 (1964).
104. Kellogg, R.M., Thykeson, E. and Warren, W.G.; “The influence of wood and fiber properties on kraft converting- paper quality”. Tappi 58(12):113–116 (1975).
105. Bodig, J. & Jayne, B.A.; “Mechanics of wood and wood composites”. Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York. (1982).

106. Cown, D.J., Hebert, J. & Ball, R.; "Modelling *Pinus radiata* lumber characteristics. Part 1. Mechanical properties of small clears". NZ. J. For. Sci. 29: 203–213 (1999).

## ANEXO 1: MEDICIONES

Tabla A.1: Valores de los parámetros dendrométricos del material muestreado.

Cant. Arb.	Trat. Raleo	Código	Estrato	dap (cm)	h (m)	dbcv (cm)	hbcv (m)	lcv (m)	h5cmpf (m)
1	0%	T0-1	S	18,62	22,50	8,30	16,20	6,30	18,90
2	0%	T0-2	S	20,01	21,00	8,80	16,50	4,50	19,80
3	0%	T0-3	CD	26,74	25,90	14,00	16,90	9,00	23,60
4	0%	T0-4	CD	27,06	22,97	14,08	15,67	7,30	21,50
5	0%	T0-5	D	32,31	25,80	19,50	17,30	8,50	23,60
6	0%	T0-6	D	33,42	26,80	25,00	15,30	11,50	25,30
7	50%	T1-1	S	19,42	19,10	10,50	11,15	7,95	16,00
8	50%	T1-2	S	20,21	23,30	12,50	11,50	11,80	20,40
9	50%	T1-3	CD	24,51	24,70	10,50	17,60	7,10	21,60
10	50%	T1-4	CD	28,01	25,00	18,50	15,00	10,00	22,60
11	50%	T1-5	D	36,29	27,90	20,00	19,20	8,70	25,80
12	50%	T1-6	D	47,75	29,50	31,00	19,15	10,35	26,50
13	75%	T2-1	S	18,14	18,27	10,00	11,50	6,77	15,80
14	75%	T2-2	S	33,10	26,80	25,00	16,90	9,90	24,20
15	75%	T2-3	CD	35,49	25,70	22,50	13,35	12,35	23,47
16	75%	T2-4	CD	36,29	27,90	22,00	15,36	12,54	24,79
17	75%	T2-5	D	39,47	28,80	29,00	14,10	14,70	25,70
18	75%	T2-6	D	42,34	29,30	25,00	16,70	12,60	26,30
19	87,5%	T3-1	S	38,04	21,50	28,90	6,80	14,70	18,70
20	87,5%	T3-2	S	41,38	26,50	26,50	15,30	11,20	24,00
21	87,5%	T3-3	CD	43,29	24,00	28,00	13,20	10,80	21,80
22	87,5%	T3-4	CD	45,52	25,00	30,50	6,60	18,40	20,80
23	87,5%	T3-5	D	45,84	28,50	33,30	11,80	16,70	23,90
24	87,5%	T3-6	D	47,75	27,60	31,50	12,30	15,30	24,50

Donde Trat.=tratamiento de raleo; Código=tratamiento y árbol; dap=diámetro del árbol a la altura de pecho; h=altura total; dbcv= diámetro en la base de la copa viva; hbcv=altura hasta la base de la copa viva del árbol; lcv=longitud de copa viva; h5cmpf= altura donde el diámetro es de 5 cm; S=suprimido, CD=codominante, D=dominante; P=pequeño; M=mediano; G=grande.

## ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS

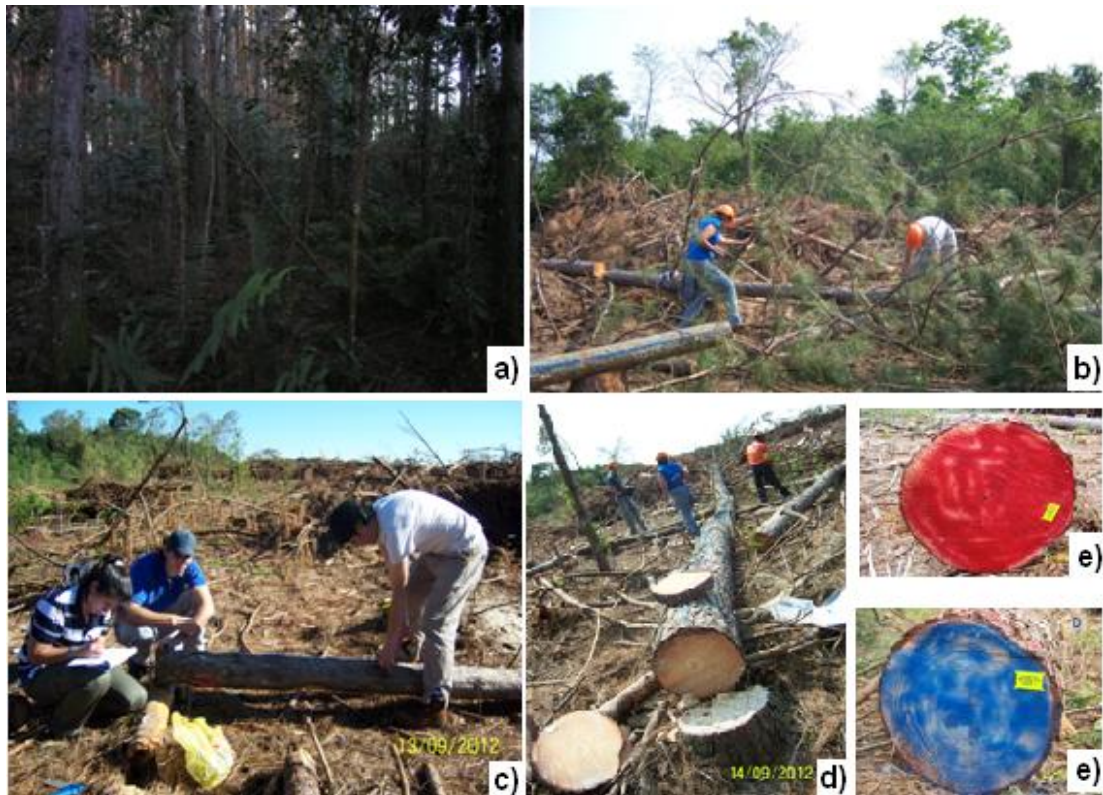


Figura A.2.1: Desarme de árboles. a) vista del ensayo, b) apeo árboles, c) toma de datos, d) extracción de rodajas, e) pintado de los extremos de las trozas.



Figura A.2.2: Aserrado. a) y b) proceso de aserrado, c) tablas para llevar al secadero, armado de rollos y d) selección de muestras para ensayos mecánicos.

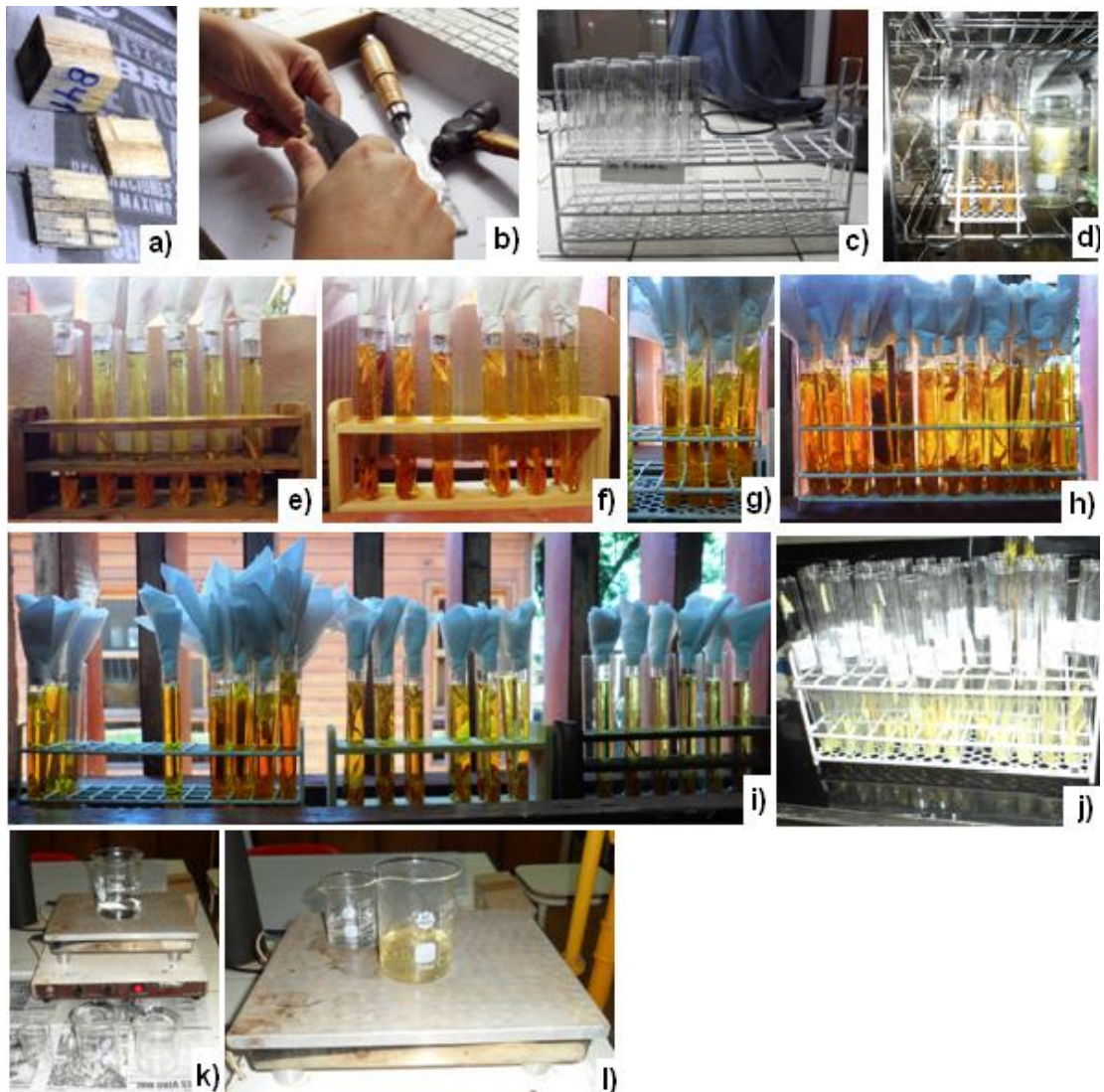


Figura A.2.3: Proceso macerado. a) muestra, b) astillado, c) numeración de tubos, d) saturación de astillas en estufa, e) astillas en clorito etapa 1, f) astillas en clorito etapa 2, g) astillas en clorito etapa 3, h) astillas en clorito etapa 4 i) secuencia del cambio de coloración en la solución de clorito, j) muestra pre-lavada, k) calentamiento solución de carbonato, l) muestras en carbonato.

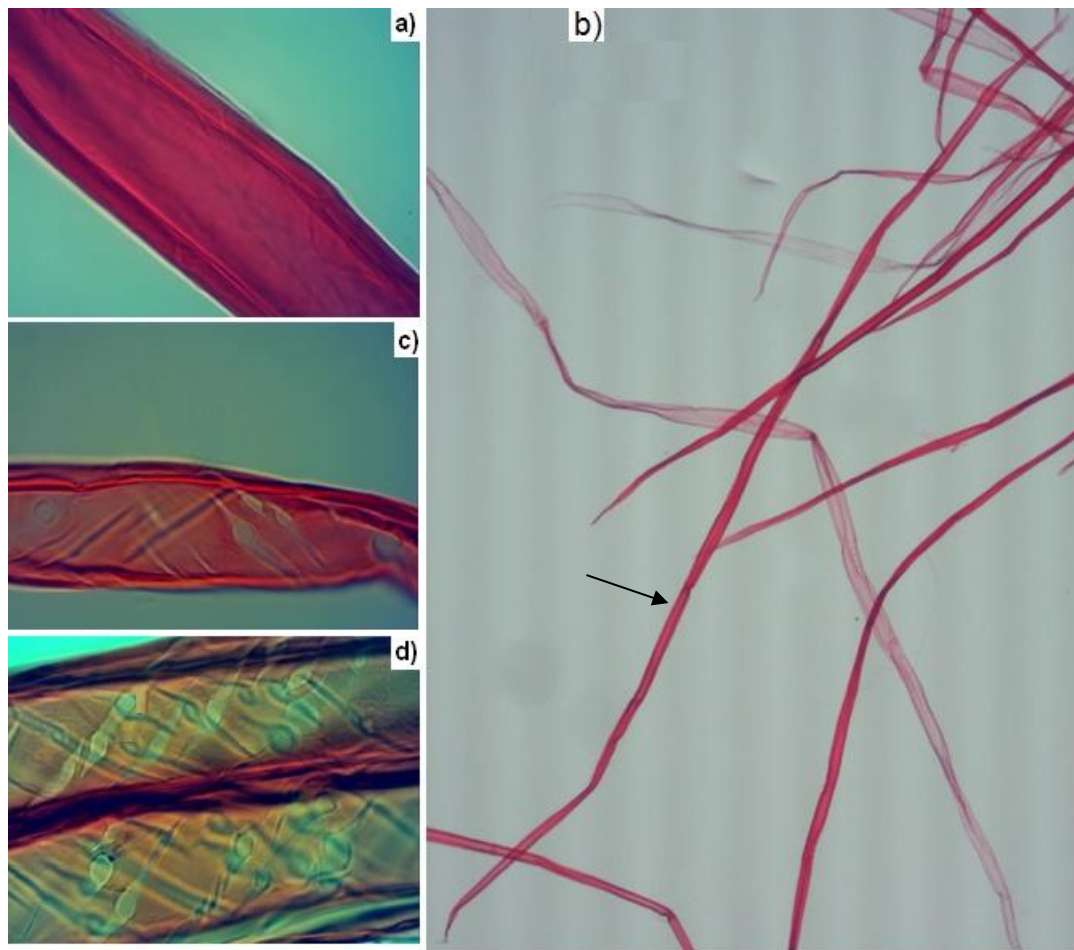


Figura A.2.4: Traqueidas para medición, a) espesor de pared, aumento 1000X, b) longitud de traqueida, aumento 40X, c y d) ángulo microfibrilar, aumento 1000X.





Figura A.2.5: Ensayos de propiedades físicas, a) medición de diámetro mayor y menor y marcación de probetas para densidad básica, b) preparación de probetas para densidad básica, c) muestras para densidad básica para ser llevadas a la estufa, d) rodaja para determinación de leño temprano y tardío, e) probetas para determinar contracción en los 3 planos de corte (axial, radial y tangencial).

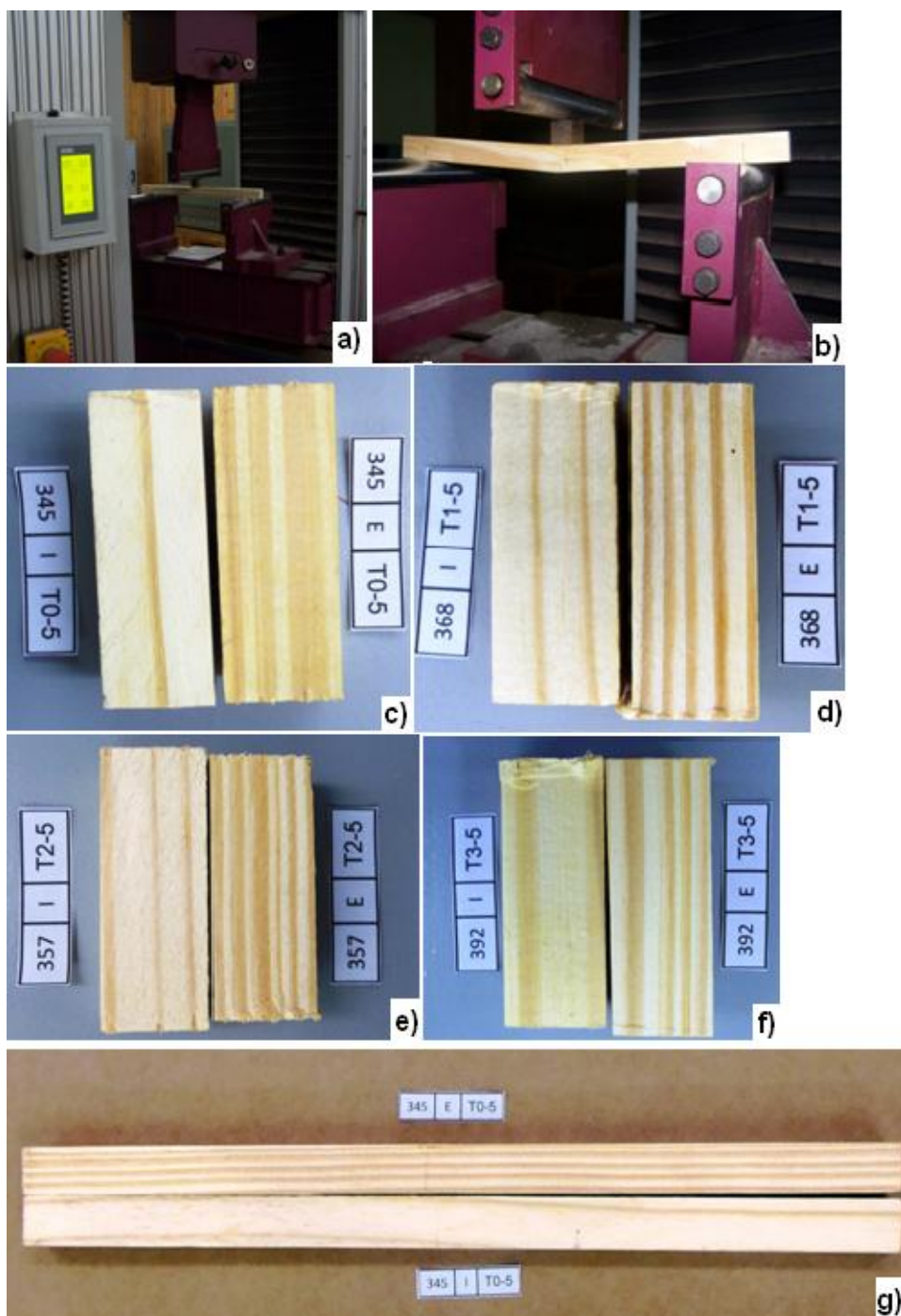


Figura A.2.6: Ensayos mecánicos, a) máquina universal de ensayos, b) realizando un ensayo de flexión estática, c), d), e) y f) probetas externas e internas del árbol 5 de los tratamientos T0, T1, T2 y T3 que se realizaron ensayos de compresión paralela a las fibras, g) probetas externas e interna de ensayos de flexión.

### ANEXO 3: GRÁFICOS DE CAJAS

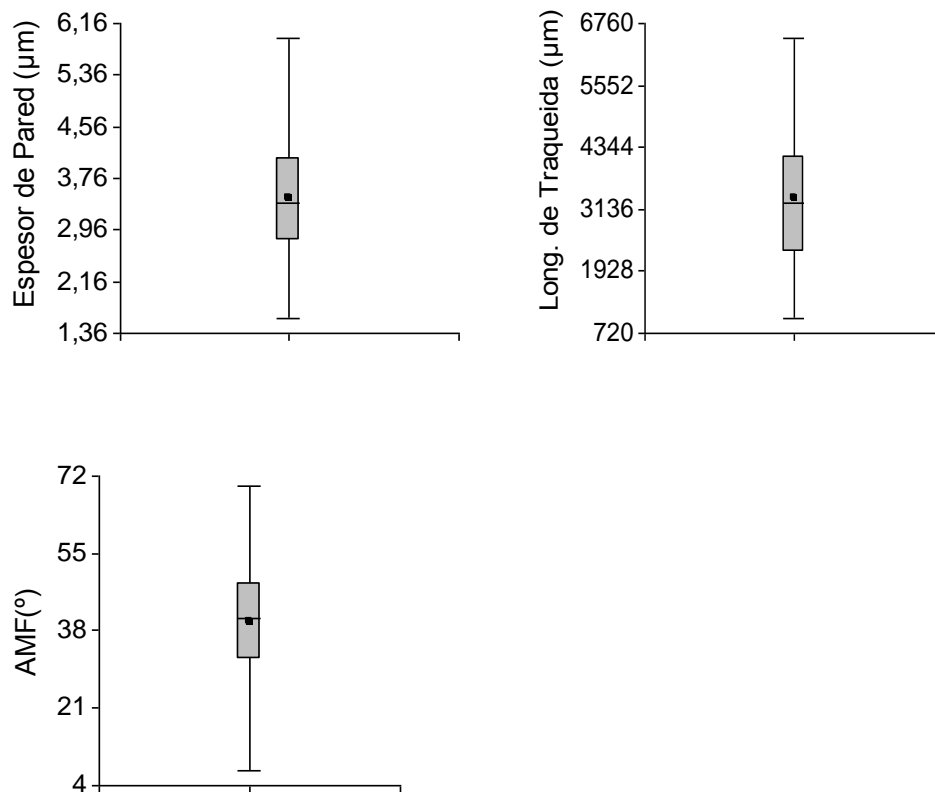


Figura A.3.1: Gráfico de cajas para las variables espesor de pared, longitud de traqueida y ángulo microfibrilar.

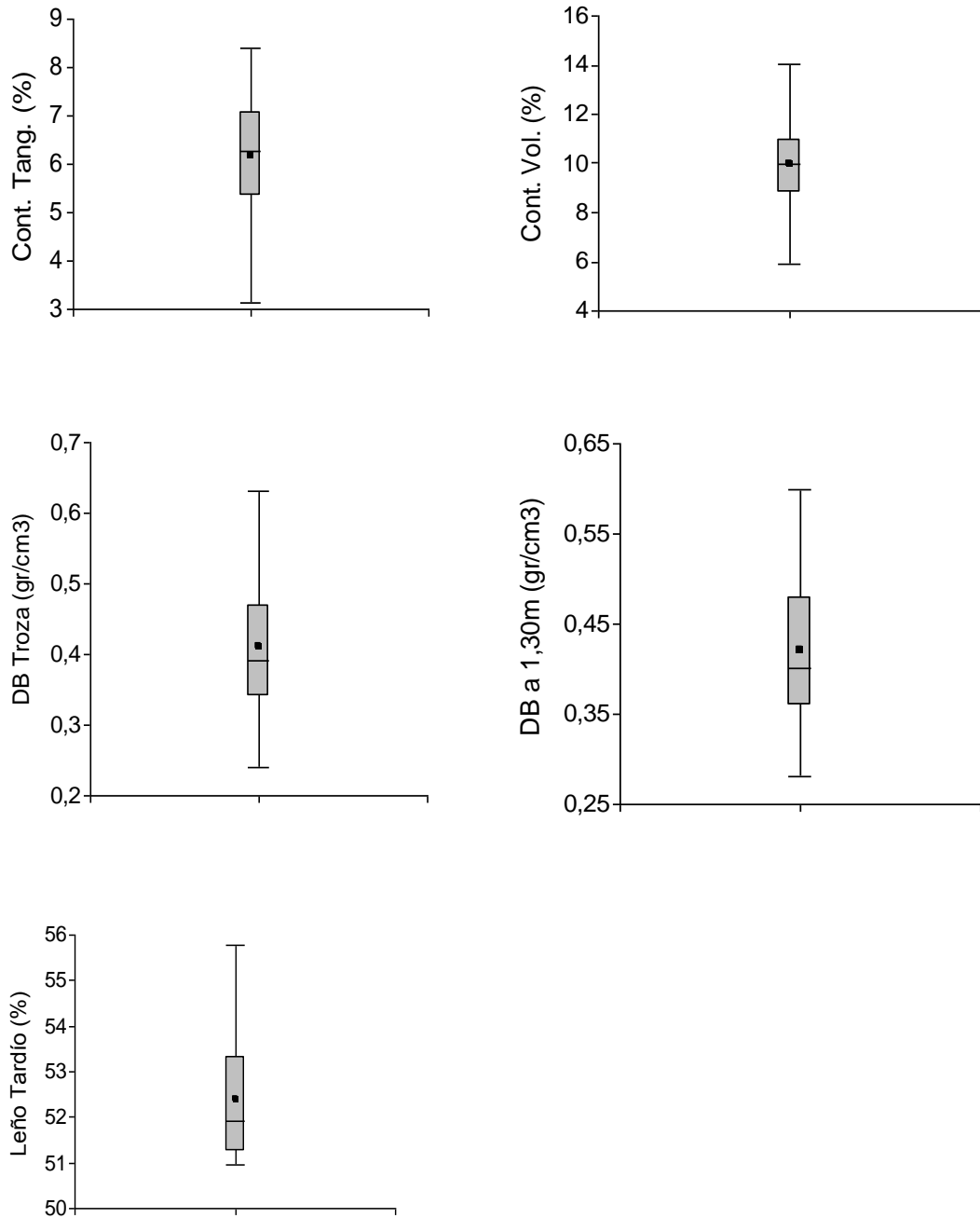


Figura A.3.2: Gráfico de cajas para las variables contracción tangencial y volumétrica, densidad básica de la troza, densidad básica a 1,30 m de altura y leño tardío.

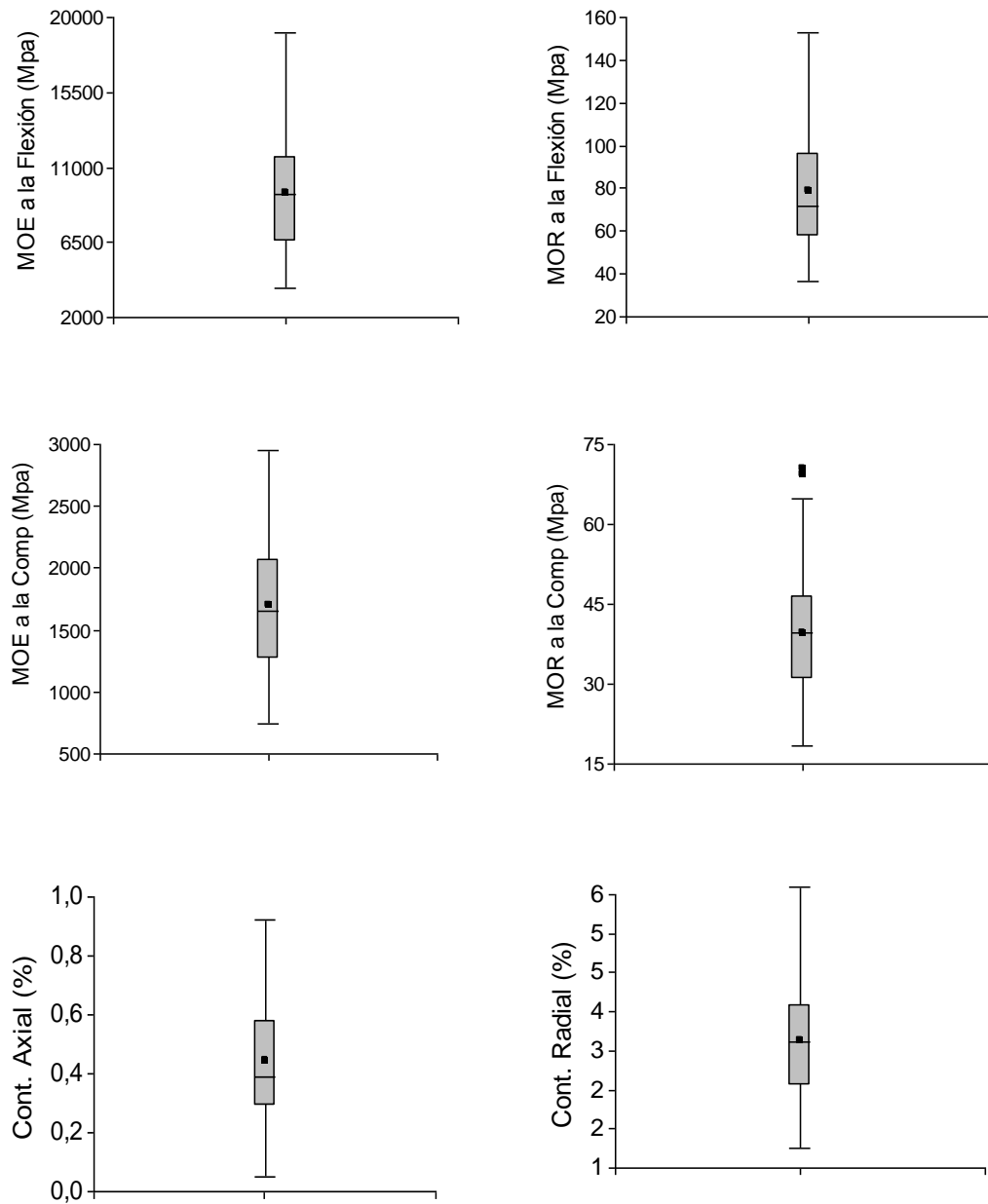


Figura A.3.3: Gráficos de cajas para las variables módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras, contracción axial y radial.

## GLOSARIO

DAP=diámetro medio del rodal a la altura de 1,30 m.

dap=diámetro del árbol a la altura de 1,30 m.

dbcv=diámetro en la base de la copa viva.

hbcv =altura hasta la base de copa viva.

lcv=longitud de copa viva.

gr/cm<sup>3</sup>=gramos por centímetros cúbicos.

MPa=megapascales.

MOE: módulo de elasticidad.

MOR: módulo de rotura.

AMF: ángulo microfibrilar.

DB: densidad básica.

pl/ha: plantas por hectárea.

T0: tratamiento sin raleo (0% de raleo).

T1: tratamiento con 50% de raleo de la densidad original.

T2: tratamiento con 75% de raleo de la densidad original.

T3: tratamiento con 87,5% de raleo de la densidad original.

S: suprimido.

CD: codominante.

D: dominante.

Coníferas: la palabra se refiere a especies resinosas, a los pinos.

Latifoliadas: la palabra se refiere a especies frondosas, especies de hojas anchas.