

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA EN DOS
PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis* HILL (EX MAIDEN)**

por

**Gonzalo GARCIA FREIRE
Javier TARIGO SCREMINI**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2006**

Tesis aprobada por:

Director:

CARLOS MANTERO

SADAAKI OHTA

OSCAR BENTANCOUR

Fecha: -----

Autor:

GONZALO GARCÍA FREIRE

JAVIER TARIGO SCREMINI

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a todo el personal del LATU, en especial a Hugo O' Neill y Felipe Tarigo por su interminable paciencia. Agradecemos también a los directores de la tesis Carlos Mantero y Sadaaki Ohta por el tiempo y la dedicación brindados a lo largo de la realización de este trabajo. A Oscar Bentancur por su ayuda en el análisis de los datos. Por último y no menos importante, agradecemos a nuestros padres y novias por la constante presión, sin la cual hubiera sido imposible realizar esta hazaña.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRAFICA</u>	3
2.1. <u>CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA</u>	3
2.1.1. <u>Características microscópicas</u>	3
2.1.2. <u>Características macroscópicas</u>	5
2.2. <u>PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA</u>	7
2.2.1. <u>Características de la madera que afectan sus propiedades físico .mecánicas</u>	9
2.2.2. <u>Densidad, peso específico y contenido de humedad</u>	12
2.2.2.1 Variación dentro del árbol.....	13
2.2.2.2 Variación entre árboles.....	15
2.2.3. <u>Flexión estática y dinámica</u>	17
2.2.3.1 Métodos de ensayos no destructivos.....	19
2.2.3.2 Métodos de ensayo destructivos.....	19
2.2.3.3 Módulo elástico (MOE).....	20
2.2.3.4 Módulo de rotura (MOR).....	21
2.2.3.5 Resistencia al impacto.....	22
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	24
3.1 <u>MATERIALES</u>	24
3.1.1 <u>Material experimental</u>	24
3.2 <u>MÉTODOS</u>	24
3.2.1. <u>Clasificación visual</u>	27
3.2.2. <u>Módulo de elasticidad, método no destructivo</u>	32
3.2.3. <u>Módulos de elasticidad y rotura, método destructivo</u>	33
3.2.4. <u>Ensayos con probetas libres de defectos</u>	34
3.2.4.1 Flexión estática en probetas libres de defectos.....	34
3.2.4.2 Flexión dinámica en probetas libre de defectos.....	36
3.2.5 <u>Análisis estadístico</u>	37

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	38
4.1 <u>PARÁMETROS DESCRIPTIVOS</u>	38
4.1.1 <u>Clasificación Visual</u>	38
4.1.1.1 Clasificación visual 1.....	38
4.1.1.2 Clasificación visual 2.....	39
4.1.1.3 Clasificación visual 3.....	40
4.1.1.4 Comparación entre poblaciones.....	41
4.1.2 <u>Propiedades físicas y mecánicas</u>	44
4.2 <u>ANÁLISIS DE VARIABLES</u>	49
4.2.1 <u>Densidad corriente Durazno</u>	49
4.2.2 <u>Densidad corriente Rivera</u>	51
4.2.3 <u>Densidad básica Durazno</u>	53
4.2.4 <u>Densidad básica Rivera</u>	54
4.2.5 <u>Módulo elástico no destructivo (FFT) Durazno</u>	55
4.2.6 <u>Módulo elástico no destructivo (FFT) Rivera</u>	56
4.2.7 <u>Módulo elástico destructivo (MU) Durazno</u>	57
4.2.7.1 <u>Módulo elástico destructivo piezas tamaño de obra</u>	57
4.2.7.2 <u>Módulo elástico destructivo pequeñas probetas</u>	59
4.2.8 <u>Módulo elástico destructivo (MU) Rivera</u>	60
4.2.9 <u>Módulo de rotura (MU) Durazno</u>	62
4.2.9.1 <u>Módulo de rotura piezas tamaño de obra</u>	62
4.2.9.2 <u>Módulo de rotura pequeñas probetas</u>	63
4.2.10 <u>Módulo de rotura (MU) Rivera</u>	64
4.2.11 <u>Flexión dinámica Durazno</u>	66
4.3 <u>EFFECTOS POSICIÓN Y TROZA SOBRE VARIABLES</u>	67
4.3.1 <u>Efectos por variable</u>	67
4.3.1.1 <u>Efectos de posición en radio sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (RIVERA)</u>	67
4.3.1.2 <u>Efectos de troza sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (RIVERA)</u>	68
4.3.1.3 <u>Efectos de posición en radio sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (DURAZNO)</u>	70
4.3.1.4 <u>Efectos de troza sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (DURAZNO)</u>	72
4.3.2 <u>Efectos generales</u>	73
4.3.3 <u>Comparación de las plantaciones</u>	74
4.4 <u>EFFECTO VELOCIDAD DE CRECIMIENTO</u>	75
5. <u>CONCLUSIONES</u>	77
6. <u>RESUMEN</u>	79
7. <u>SUMMARY</u>	80
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	81

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Numero de individuos y DAP medio por clase diamétrica para la plantación de Rivera.	25
2. Número de individuos y DAP medio por clase diamétrica para la plantación de Durazno.	25
3. Clasificación de tablas por ubicación en altura por muestreo.	26
4. Clasificación de tablas por ubicación en radio por muestreo.	26
5. Categoría de las piezas según superficie clear y dimensiones	31
6. Media y desvío para cada plantación (CV 1).....	38
7. Frecuencias y porcentajes para las dos plantaciones (CV 1).	39
8. Media y desvío para cada plantación. (CV 2).....	39
9. Frecuencias y porcentajes para las dos plantaciones (CV 2).	40
10. Media y desvío para cada plantación. (CV 3).....	40
11. Frecuencias y porcentajes para las dos plantaciones (CV 3).	41
12. Porcentajes medios de madera clear por localidad y clasificación.....	41
13. Límites de intervalos de confianza para el 95% de cada clasificación y localidad.	41
14. Media y distribución de las variables bajo estudio para las dos plantaciones juntas.....	42
15. Media y distribución de las variables bajo estudio para la plantación de Durazno.....	44
16. Media y distribución de las variables bajo estudio para la plantación de Rivera.	44
17. Coeficientes de correlación e intervalo de confianza del coeficiente para las variables bajo estudio para la plantación de Durazno.	44
18. Límite superior e inferior del intervalo de confianza para las medias de MOE destructivo y no destructivo para el 95%.	45
19. Coeficientes de correlación e intervalo de confianza del coeficiente para las variables bajo estudio para la plantación de Rivera.	47
20. Límite superior e inferior del intervalo de confianza para las medias de MOE destructivo y no destructivo para el 95%.	48
21. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	49
22. Tukey para densidad de tabla efecto posición para el 95%	49
23. Tukey para densidad de tabla efecto troza para el 95%	50
24. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	50
25. Tukey para densidad corriente efecto posición para el 95%	51
26. Tukey para densidad corriente efecto troza para el 95%	52
27. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	53
28. Tukey para densidad básica efecto posición para el 95%.....	53
29. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	54
30. Tukey para densidad básica efecto posición para el 95%.....	54
31. Tukey para densidad básica efecto troza para el 95%	54
32. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	55

33. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto posición para el 95%	55
34. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto troza para el 95%.....	56
35. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	56
36. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto posición para el 95%	56
37. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto troza para el 95%.....	57
38. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	57
39. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para el 95%.....	57
40. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto troza para el 95%.....	58
41. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	59
42. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para 95%	59
43. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para 95%	60
44. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	60
45. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para el 95%.....	60
46. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto troza para el 95%.....	61
47. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	62
48. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%	62
49. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	63
50. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%.	64
51. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	64
52. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%	64
53. Tukey para MOR de tabla efecto troza para el 95%.....	65
54. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).	66
55. Tukey para flexión dinámica de pequeñas probetas efecto posición para el 95%.....	66
56. Valores de alfa máximos para cada variable y población.	73
57. Intervalos de confianza para el 95% de las dos plantaciones.	74
58. Correlaciones de propiedades mecánicas y velocidad de crecimiento.....	75

Figura No.

1. Representación esquemática de una fibra de madera, mostrando el arreglo de la microfibrillas en las varias capas de la pared celular.....	4
2. Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas:.....	6
3. Relación ángulo microfibrilar con MOE	11
4. Relación ángulo microfibrilar con MOR.....	11
5. Clasificación de tablas según ubicación con respecto a la médula.	25
6. Ejemplo de distribución en altura de las trozas.	26
7. Ejemplo primer clasificación visual de probetas.....	28
8. Ejemplo en segunda clasificación visual	29
9. Ejemplo de tercer clasificación visual.	30
10. Disposición del FFT analyzer para la realización del ensayo.	32
11. Esquema de disposición de las cargas en la pieza.	33
12. Esquema de aplicación de carga para probetas libres de defectos.....	35
13. Disposición de la probeta libre de defectos para el ensayo de flexión dinámica.	37

14. MOE FFT en función de densidad corriente Durazno	46
15. MOE maquina universal en función de densidad corriente Durazno	46
16. MOE FFT analyzer en función de MOE maquina universal. Durazno	47
17. MOE FFT analyzer en función de MOE maquina universal. Rivera	48
18. Densidad corriente y densidad básica. Rivera	48
19. Densidad corriente según troza por posición en radio. Durazno	50
20. Densidad corriente por troza según posición en radio Durazno	51
21. Densidad corriente por posición en radio según troza (Rivera).	52
22. Densidad corriente por troza según posición (Rivera)	53
23. MOE (MU) por posición en radio según troza	58
24. MOE (MU) según posición en radio por troza Durazno	59
25. MOE destructivo por posición en radio según troza. Rivera	61
26. MOE destructivo por troza según posición en radio. Rivera	61
27. MOR según troza por posición en radio Durazno	62
28. MOR por posición en radio según troza Rivera	65
29. MOR por troza según posición en radio. Rivera	66
30. MOE (MU) según posición en radio Rivera	67
31. MOR según posición en radio Rivera	67
32. Densidad corriente según posición en radio Rivera	68
33. MOE (MU) según troza Rivera	68
34. MOR según troza Rivera	69
35. Densidad corriente según troza Rivera	69
36. Densidad corriente según posición en radio Durazno	70
37. MOE (MU) según posición en radio Durazno	70
38. MOR según posición en radio Durazno	70
39. Densidad corriente según troza Durazno	72
40. MOE (MU) según troza Durazno	72
41. MOR según troza Durazno	73

1.INTRODUCCIÓN

En Uruguay hay más de 670.000 hectáreas plantadas bajo proyecto de especies forestales, con una gran predominancia del genero *Eucalyptus*. El mismo se encuentra en esta región en condiciones favorables para su cultivo, produciendo excelentes resultados debido al rápido crecimiento y a la calidad de su madera. Su cultivo comenzó en la década del 50, alcanzando su mayor incremento a partir de 1990.

La ampliación de la base de la oferta de materia prima forestal en Uruguay, prevé un incremento en la oferta de madera de distintas especies, destinada a varios usos. Entre ellos, la producción de fibras para exportación y consumo interno es de las más importantes, así como también lo es la producción de madera sólida para distintos sectores como estructuras y construcción civil en general. Es fundamental por lo tanto que las maderas producidas sean caracterizadas por sus propiedades físico – mecánicas.

Dentro del genero mencionado, la especie *Eucalyptus grandis*, cubre una superficie de 150.000 ha plantadas bajo proyecto, siendo la segunda especie forestal de mayor superficie plantada en nuestro país. Esta especie presenta características favorables para su utilización como madera estructural así como para la producción de madera *clear* para la confección de muebles.

La utilización de la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* en la construcción se ha producido sin conocer sus propiedades físicas y mecánicas más importantes y en la ausencia de un marco normativo que garantice la calidad necesaria para un buen uso (Belvisi et al., 1998). Estas condiciones condujeron a una pérdida de prestigio del material y, consecuentemente, a su empleo en estructuras poco importantes, con escaso valor agregado.

Para revertir la pérdida de competitividad frente a otros materiales de construcción en general y a otras especies en particular, para uso estructural, es necesario en primer lugar determinar sus propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez ante distintos tipos de esfuerzos, y las propiedades físicas más importantes. A su vez, estudiar la influencia que los defectos ejercen sobre esas propiedades.

Resulta entonces de fundamental importancia clasificar por propiedades físico mecánicas la madera de *Eucalyptus grandis* cultivado en Uruguay, como primer paso para resolver el problema existente y potenciar su empleo como material estructural, garantizando la confiabilidad que los modernos conceptos de diseño llevan implícita.

El diseño de estructuras de madera debe brindar seguridad frente a la rotura y asegurar un correcto funcionamiento durante la vida útil prevista (Thelandersson, 1995a,

1995b). En particular para las vigas sometidas a flexión, el último aspecto, relacionado a las deformaciones, suele determinar las dimensiones finales del elemento estructural. La falta de consideración de este proceso, o una interpretación equivocada de los factores que inciden sobre el, es causa frecuente de comportamientos insatisfactorios.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

2.1.1 Características microscópicas

La madera es un sólido natural, de porosidad fina. Esta compuesta fundamentalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. De acuerdo a la especie, se encuentran presentes también resinas, terpenos, taninos, minerales y sustancias incrustantes, también conocidas como extractivos (Tuset, 1979).

Debido a la forma alargada de las paredes de las células y a su estructura orientada, así como a las diferencias que presentan por su función, época y forma de crecimiento, es fuertemente heterogénea y anisótropa, lo cual motiva que las propiedades se deban analizar según tres direcciones principales, la longitudinal, la radial y la tangencial (Coronel, 1994).

La madera de las especies frondosas presenta una anatomía compleja, conteniendo un gran número de tipos celulares, los cuales cumplen distintas funciones fisiológicas.

Se pueden diferenciar varios grupos, en el primero están las fibras, que proveen la resistencia mecánica, constituyendo el tejido de sostén (Tuset 1979, Piter 2003).

En el segundo está el tejido de almacenamiento o parénquima, que aparece tanto en sentido longitudinal como radial. Este tejido cumple la función de dar resistencia y a su vez de transportar alimentos. Se organiza en filas radiales, presentando paredes más gruesas y menores diámetros en la madera tardía que en la temprana, originando diferentes densidades, y su longitud coincide con la dirección del eje del árbol (Tuset 1979, Piter 2003).

El otro grupo es el constituido por el tejido de reserva, el parénquima, que se ocupa de almacenar los elementos nutritivos y se desarrolla fundamentalmente en sentido radial (Tuset 1979, Piter 2003).

Todos estos tejidos están formados por células que se caracterizan por tener una pared celular que se compone de tres capas denominadas pared primaria, secundaria y terciaria. La sustancia básica que compone la pared celular es la celulosa, que se

presenta agregada en unidades largas llamadas fibrillas, las que, a su vez, se unen para formar las microfibrillas, en las cuales la celulosa está entrelazada en una matriz de hemicelulosa y revestida por lignina (Tuset 1979, Piter 2003).

En la figura N° 1 se observa que la pared primaria se encuentra en contacto con la laminilla media y en la misma las microfibrillas se orientan al azar. La secundaria se puede descomponer en tres partes bien diferenciadas, una externa muy delgada (S1), con un espesor del orden de décimas de micrómetro, que presenta un promedio de inclinación de las microfibrillas, con respecto al eje de la célula, de entre 50° y 70°. Una parte media (S2) que cuenta con un mayor espesor y con las microfibrillas orientadas mayoritariamente en la dirección longitudinal (de 5° a 20°) de manera que van enrollando al eje de la fibra en sentido helicoidal de manera empinada. El ángulo de la hélice o espiral, es denominado ángulo microfibrilar (AMF). Finalmente, una parte interna (S3) que no ofrece un orden estricto en su orientación. La pared terciaria se ubica contra el espacio interior de la célula (Coronel 1994, Piter 2003).

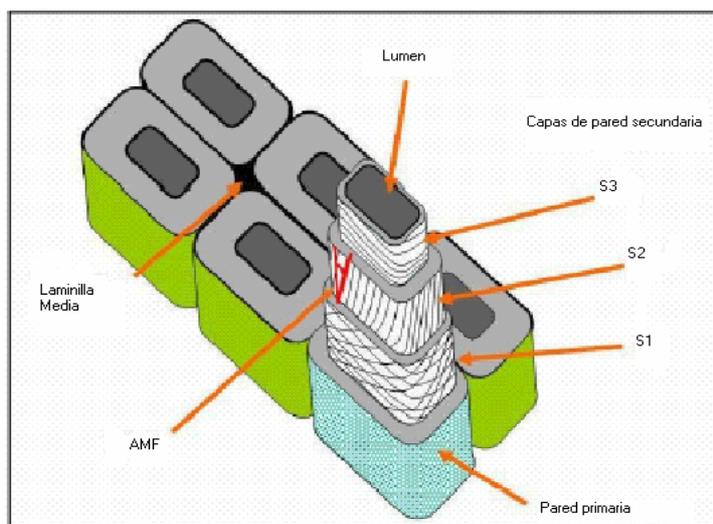


Figura N° 1: Representación esquemática de una fibra de madera, mostrando el arreglo de la microfibrillas en las varias capas de la pared celular.

La figura N°1 representa esquemáticamente según El-Hosseiny y Page (1973), una fibra de madera, mostrando el arreglo de las microfibrillas celulósicas en las varias capas de la pared celular, donde P representa la pared primaria; S1, S2 y S3 son las múltiples capas de que se compone la pared secundaria. Nótese la orientación de las microfibrillas en las sucesivas capas, con el detalle del ángulo para el caso de la S2, determinado por el eje de la fibra y la orientación de sus microfibrillas.

La estructura de la pared celular puede analizarse también, desde el punto de vista de su comportamiento estructural, considerando que la capa media de la pared secundaria, que es la más importante, puede absorber los esfuerzos de tracción favorablemente, debido a la orientación predominantemente longitudinal de las microfibrillas que la integran (Piter, 2003).

También, Page (1969) afirma, que esta es por lejos la más espesa, entre el 80-95% del material de pared celular esta contenido dentro de la misma, por lo que su ángulo microfibrilar es importante en el estudio del comportamiento físico de las fibras y la madera. De esto último Page et al. (1972) dan los siguientes ejemplos, la tensión o fuerza de la fibra depende del ángulo fibrilar y la contracción de una pieza de madera depende del valor promedio de éstas, tal como lo confirman Harris et al. (1965).

En resumen, la madera esta formada por una gran cantidad de células cementadas entre si. Las células de la madera son tubulares. Las paredes de las células están formadas por varias capas de celulosa y lignina principalmente. La celulosa constituye la estructura de las paredes celulares. La lignina actúa como un cementante que liga los elementos de la estructura y da rigidez al conjunto. Entre el 60 – 70 % de la madera está compuesta por celulosa y 15 – 35% corresponde a lignina. Estos dos elementos son los que definen las propiedades mecánicas de la madera (Coronel, 1996). Las demás sustancias que pueden existir imparten características de olor, color, sabor, e influyen en la permeabilidad (Fernández y Echenique, citados por Coronel, 1996).

2.1.2 Características macroscópicas.

Considerando los aspectos macro estructurales de la madera, el crecimiento vertical del árbol ocurre en forma continua, y en la parte central del mismo aparece la médula El crecimiento de las capas periféricas del tronco, responsables por el desarrollo horizontal, da lugar a la formación de los anillos anuales de crecimiento.

El tejido celular que produce la nueva madera se denomina cambium y está ubicado en la parte externa, recubierto por la corteza, y es muy delgado. Si se observa a simple vista la sección transversal del tronco, se puede apreciar que ese desarrollo se produce con dos tipos diferentes de tejidos, que responden a la madera generada en primavera, o leño temprano, y a la formada en el otoño, o leño tardío, respectivamente. Ambos, sumados, constituyen un anillo anual (Tuset, 1979).

La diferencia entre ambos tejidos es más nítida en algunas especies que en otras, pero, en general, los formados en primavera poseen células de paredes más delgadas y mayor lumen, para facilitar el transporte de savia. Por el contrario, los de otoño tienen

células con mayor espesor de paredes y menores huecos, confiriendo mayor resistencia al material que conforman.

La madera generada en primavera es en general de color más claro y posee menor densidad que la del otoño, precisamente como consecuencia del menor espesor de sus paredes. Si bien es necesario tener en cuenta algunas variables tales como la especie, el clima y las condiciones del suelo donde se desarrolla la planta, entre otras, en general existe una relación entre el espesor de los anillos y la densidad (Coronel, 1994).

A su vez, en la medida que transcurre la vida del árbol y aumenta la cantidad de anillos, se generan dos grandes zonas en el corte transversal. La parte más joven, la externa, por la cual asciende la savia desde las raíces hacia el extremo superior, se denomina albura. Con el paso del tiempo las células son modificadas, incrustadas con extractivos orgánicos, dando lugar a la formación del duramen en la zona interior. Este es generalmente más denso, menos permeable y más resistente a los ataques de insectos y hongos (Tuset, 1979).

A su vez, puede considerarse otra diferencia entre los anillos de crecimiento que se formaron en la época temprana del fuste, con aquellos que ocupan la parte exterior del mismo. A la madera formada por los primeros anillos, se le denomina madera juvenil, y al resto se le denomina madera adulta.

La madera juvenil presenta características particulares como ser, menor espesor de pared celular, lo que lleva a un menor peso específico aparente; fibras más cortas; mayor ángulo micro fibrilar con lo cual la resistencia a la flexión de esta madera será menor; la contracción transversal es menor que para la madera adulta, mientras que la longitudinal es mayor y también presenta una mayor tendencia al alabeo durante el secado. La madera juvenil, presenta menor resistencia y rigidez, mayores tensiones de contracción y expansión que la madera adulta (Coronel, 1994). (Figura 2)

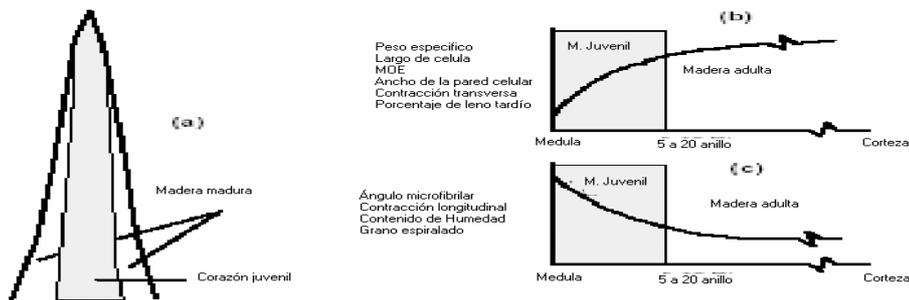


Figura N°2. Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas:

- (a) Corazón juvenil localizado en el interior del tronco de un árbol
- (b) Propiedades que se incrementan desde la madera juvenil a la madura.
- (c) Propiedades que disminuyen desde la madera juvenil a la madura.

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que éste actúe química o mecánicamente sobre su estructura interna. Por otra parte, las propiedades mecánicas son aquellas que indican su comportamiento resistente y elástico bajo la acción de cargas o sollicitaciones exteriores (Coronel, 1994).

Por lo expresado, las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que miden la aptitud, y capacidad para resistir cargas externas. Se debe aclarar que dentro de este concepto no se incluyen los esfuerzos debidos a las tensiones internas que pueden ocasionarse por los cambios de humedad.

El accionar de las cargas o fuerzas sobre la madera, da lugar a diversos efectos o comportamientos. Entre ellos se pueden mencionar:

- Bajo cargas reducidas la madera se deforma de acuerdo a la ley de Hooke, es decir que en una pieza, la deformación es proporcional al esfuerzo o carga por unidad de área. Por lo tanto, al tener la madera las características de un material cristalino, sigue las particularidades de este material, o sea, que la relación entre esfuerzo y deformación en la región elástica es lineal. Es así como en esta zona la madera presenta un comportamiento elástico.

- Cuando la carga sobrepasa un determinado valor (denominado límite de proporcionalidad o elástico), el comportamiento de la madera es diferente; ya que se produce un fenómeno de escurrimiento o de deslizamiento viscoso del material leñoso siguiendo la ley de Newton. En este escurrimiento o fluencia los correspondientes esfuerzos que se producen están relacionados fundamentalmente con la velocidad de la deformación; presenta la característica de que a pesar de las cargas aplicadas, la estructura interna permanece continua, y además, produce en la madera el comienzo de una deformación parcialmente irreversible. El comportamiento de la madera en esta parte, nos da a entender que se trata de un macro polímero, con características visco – elásticas y en el cual el tiempo de duración de la carga tiene gran importancia sobre todo en las construcciones de madera. Otros autores denominan a este comportamiento como semi plástico. De cualquier forma, la explicación de ello se encuentra en la estructura cristalina – paracristalina o amorfa de la pared celular. Aquí la madera

comienza a comportarse prácticamente como un material plástico y toma una deformación parcialmente irreversible.

- Al agregarse más carga a la pieza, el fenómeno de deslizamiento del material leñoso continúa con mayor velocidad. El esfuerzo que se obtiene está en dependencia también del tiempo en que actúa la carga, y comienzan a producirse en la madera lugares de discontinuidad en la estructura celular, acentuándose la deformación plástica; por lo tanto la madera presenta en esta parte un comportamiento netamente plástico, con un proceso de deformación irreversible. Al seguir aumentando la carga, llega un momento en que se produce la rotura de la pieza; la tensión o esfuerzo al cual ello sucede se denomina resistencia máxima de la madera o simplemente resistencia.

En base a esta breve descripción de los comportamientos de las maderas cuando sobre ellas actúan solicitaciones externas, puede indicarse que las propiedades mecánicas de la madera están relacionadas fundamentalmente con las cargas aplicadas, como asimismo en determinadas circunstancias, con el tiempo en que actúan las cargas, o con la forma en que se realizan los diversos ensayos.

Dada la gran cantidad de especies madereras empleada en las construcciones en general, y a la gran variación que pueden presentar sus propiedades, debido a la estructura anatómica, humedad, influencia de factores externos, etc, es que para clasificarlas y obtener de las investigaciones valores que resulten comparativos, los ensayos no pueden realizarse a voluntad, sino que deben seguirse las normas técnicas brindadas por instituciones u organismos especializados, donde se indican los procedimientos para seguir, como resultado de sus propias experiencias y por consulta con los productores e industriales, que en definitiva son los que dan uso práctico a las maderas (Coronel, 1994).

De esta forma, una Norma Técnica contiene los requisitos que deben reunir las maderas, como asimismo las metodologías y procedimientos a que deben someterse las mismas para determinadas finalidades. En definitiva, una Norma es una especificación técnica, que resume el conocimiento del investigador, como así mismo del productor y del industrial, y que posibilita al consumidor, obtener resultados adecuados con un estándar mínimo compatible con la tecnología que aplique (Coronel, 1994).

Las normas Técnicas pueden ser nacionales o internacionales. En cada país se utilizan normas específicas de acuerdo a la transacción o la comparación a realizar para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera. Entre ellas pueden mencionarse: UNIT, Instituto Uruguayo de normas Técnicas, ASTM, American Society for testing Materials, DIN, Deutsches Institut Für Normung, ISO, internacional Standard Organization, Copant, Comité Panamericano de Normas Técnicas etc.

2.2.1 Características de la madera que afectan sus propiedades físico-mecánicas

Los defectos de importancia para el uso estructural de la madera que influyen sobre sus propiedades resistentes y de rigidez, provienen tanto de las condiciones de crecimiento del árbol, como del proceso de producción de la madera aserrada. Las más significativas debidas al crecimiento son la presencia de nudos y la desviación de las fibras (Tuset, 1979).

Los nudos se originan como consecuencia de la existencia de ramas que se desprenden del tronco principal y están conectadas hasta la médula. En la medida que los sucesivos anillos de crecimiento engrosan la parte exterior del árbol, la parte incluida de la rama, la cual también aumenta su diámetro, forma un cono que se desarrolla junto con el tronco (Tuset, 1979).

Cuando el corte de la pieza extraída del tronco principal comprende a ese cono, se encuentra un nudo, el cual, en este caso, se denomina nudo fijo. Si la rama se desprende, las sucesivas capas de madera nueva envuelven al cono que ella formaba, el cual no se desarrolla más en conjunto con el árbol ni afecta a los nuevos anillos externos de crecimiento, dando lugar a la formación de un nudo flojo o suelto, que incluso puede contener parte de la corteza (Tuset, 1979).

Es fácil comprender que una adecuada poda puede provocar que en una sección transversal se encuentre un importante manto exterior de madera sana, ya que la eliminación de las ramas en forma temprana ocasiona que los nudos queden solamente en la zona interior del tronco, cercana a la médula. La interrupción como la desviación de las fibras que ocasiona la presencia de un nudo constituye un defecto que afecta la resistencia y rigidez del material (Tuset, 1979).

Otro defecto que es importante destacar es la producción de fisuras, que normalmente ocurre como consecuencia de los diferentes niveles de contracción que experimenta este material según las tres direcciones principales de análisis. La contracción de una pieza de madera se produce como consecuencia de la pérdida de agua por debajo del punto de saturación de las fibras. El contenido de humedad correspondiente al punto de saturación de las fibras se sitúa, para la mayoría de las especies, entre el 25% y el 35%, siendo el valor de $H = 28\%$ suficientemente aproximado para los fines prácticos (Tuset, 1979). La acumulación de agua por encima de ese punto (agua libre) no produce variaciones en las paredes celulares, ya que se deposita en los orificios, permaneciendo las propiedades físicas y mecánicas prácticamente constantes.

La fuerte anisotropía que caracteriza a este material origina grandes diferencias en el valor de las contracciones, experimentándose las mayores en la dirección tangencial, que pueden alcanzar hasta un 10%, siguiéndole en importancia la radial con un 6% y en menor medida la longitudinal entre 0.1 y 0.3% (Coronel, 1994).

Debe considerarse que estos valores son estimativos y varían, si se tiene en cuenta la heterogeneidad del material. Este comportamiento produce deformaciones no deseadas en piezas individuales y en estructuras compuestas, y también ocasiona rajaduras y torceduras durante el proceso de secado. Su conocimiento y limitación son especialmente importantes cuando se desean lograr tiempos breves en el secado artificial, que es el que se efectúa con regulación de humedad y temperatura, para reducir el contenido de humedad en la madera aserrada (*H*) por debajo del 20%.

El contenido de humedad en la madera, mientras se encuentra situado por debajo del punto de saturación de las fibras, afecta su comportamiento físico y mecánico de manera fundamental. Es también un factor decisivo en lo referente a la durabilidad natural de este material, que es susceptible de ser atacado biológicamente por hongos o por insectos.

Cuando las fibras no corren paralelas al canto de las piezas existen fibras inclinadas, que al ser solicitadas por esfuerzos de tracción o compresión tendrán componentes actuando perpendicularmente a las fibras que disminuyen la resistencia de la madera. La inclinación de las fibras puede tener dos causas principales: una la inclinación constante y que sigue la forma de espiral según la dirección longitudinal del fuste o por piezas que por su mal aserrado presentan este defecto (Coronel, 1996).

La inclinación de las fibras afecta considerablemente el comportamiento mecánico de las piezas de madera debido a su naturaleza anisotrópica.

El corazón quebradizo es una imperfección que ocurre en la zona central del tronco, alrededor de la médula. Aparentemente se debe a efectos de fuerzas de compresión ejercidas sobre esa zona por tensiones de crecimiento o por efecto del viento o por ambos. La madera de esta zona es quebradiza y de baja resistencia mecánica (Hillis, 1978).

En los párrafos anteriores se hizo referencia a que la madera está formada por células de formas variadas, y que su estructura interna se puede analizar considerando fundamentalmente las direcciones longitudinal, radial y transversal. A su vez, la presencia de nudos y la desviación de las fibras, entre otras particularidades, ejercen normalmente una gran influencia sobre su comportamiento. A la anisotropía y heterogeneidad presentes en este material, se debe sumar la variabilidad que sus propiedades experimentan entre distintas especies, también entre regiones de cultivo, entre árboles, dentro de un mismo árbol y de una sección transversal (Coronel, 1994).

Lima y Bolsón de Muñiz, citados por Fernández (2004), en un trabajo con híbridos de *Eucalyptus* encontraron que tanto las propiedades físicas como las propiedades mecánicas presentan variación dentro del árbol; y que estas son mayores en la dirección radial que en la dirección longitudinal. La densidad de la madera fue la única que presentó una correlación estadística alta con el resto de las propiedades mecánicas.

Anteriormente también se menciona la importancia del ángulo microfibrilar, según Walker y Woollons (1997), el ángulo microfibrilar es la característica fundamental que determina las propiedades de la madera, y reportan que este varía en función del número y de la altura del árbol. Cuanto mayor es este ángulo menor serán las propiedades mecánicas de la madera (figura 3 y 4)

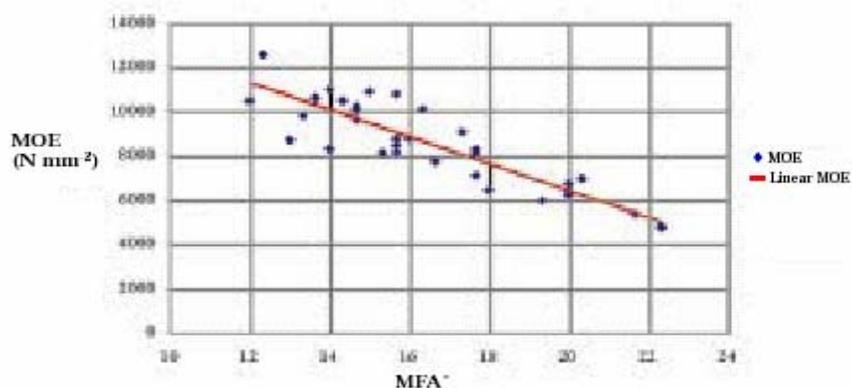


Figura N° 3. Relación ángulo microfibrilar con módulo elástico.
Fuente: Treacy et al. (2000)

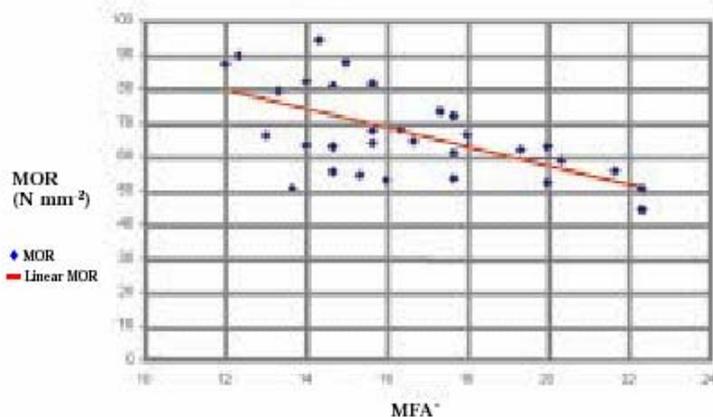


Figura N°4. Relación ángulo microfibrilar con módulo de rotura.

Fuente: Treacy et al. (2000)

2.2.2 Densidad, peso específico y contenido de humedad

Las propiedades físicas más destacadas para el uso estructural de la madera son el contenido de humedad, densidad aparente y ángulo microfibrilar. Anteriormente se mencionó que la primera tiene una incidencia directa sobre los fenómenos de contracción y expansión cuando experimenta variaciones por debajo del punto de saturación de las fibras, pudiendo ocasionar deformaciones y fisuras.

La importancia del punto de saturación de las fibras, que puede considerarse a los fines prácticos para $H = 28\%$, deriva del hecho que a partir del mismo el agua perdida es extraída de las paredes y por lo tanto las modifica, produciendo alteraciones tanto de las dimensiones como del comportamiento resistente y elástico de las piezas. Es decir que en la medida que disminuye el contenido de humedad por debajo del punto de saturación, se produce una reducción de las dimensiones y un aumento, en general, en la resistencia y rigidez de la madera.

La influencia negativa que ejerce el incremento de humedad sobre la resistencia y la rigidez varía en general para cada tipo de esfuerzo, e incluso se manifiesta en el valor que alcanzan las deformaciones diferidas en vigas sometidas a esfuerzos de larga duración, donde tiene una fundamental importancia no sólo el contenido de humedad inicial sino las variaciones que éste experimenta mientras el elemento estructural se encuentra cargado (Andriamitantsoa, citado por Piter, 2003).

El peso específico puede ser real o aparente, el peso específico real se calcula como la relación entre el masa de la madera, sin poros, y el volumen que esta ocupa, estos valores se miden con la madera en estado anhidro. El peso específico aparente se mide teniendo en cuenta el peso de la madera con los poros incluidos y el volumen se mide en diferentes condiciones de humedad. De acuerdo con estas condiciones de humedad se diferencia: peso específico aparente anhidro, básico y corriente. El anhidro es el que se obtiene de la relación peso anhidro / volumen anhidro, el básico se obtiene del peso anhidro / volumen en verde y el corriente se obtiene del peso anhidro / el volumen con un 12% de humedad, considerando las normas técnicas ASTM (Tuset, 1979).

La densidad aparente se define como el cociente entre la masa y el volumen correspondiente. Teniendo en cuenta que normalmente este material contiene humedad, cuya masa se agrega a la de la madera y a su vez produce variaciones en el volumen, se debe definir siempre el contenido de humedad para el cual se calcula la densidad. Existen dos formas más frecuentes de determinarla, una es la denominada densidad en

clima normal, ya definido, y la otra es la densidad anhidra, para la madera secada al horno, es decir sin contenido de humedad, salvo la de constitución.

La densidad es una propiedad muy importante de la madera, ya sea para uso pulpería como para la construcción. Para este último fin es importante debido a que presenta una correlación alta con las diferentes propiedades mecánicas. El módulo elástico y el módulo de rotura se incrementan con el incremento de la densidad (Haygreen y Bawyer, citados por Piter, 2003).

Pérez del Castillo (2001) en un estudio con probetas libres de defectos de *Eucalyptus grandis* encontró una correlación entre el módulo elástico y la densidad de 0.624, en el mismo trabajo la correlación entre módulo de rotura y la densidad fue de 0.825.

Fernández (2004), encontró una densidad media de 0.368 g / cm^3 para *Eucalyptus grandis* de 2 y 3 años de edad del departamento de Rivera. Böthig (2001) que también trabajo con *Eucalyptus grandis* del departamento de Rivera pero con una edad de 13.5 años, encontró con un 95% de confianza una densidad promedio de la madera de 0.463 g / cm^3 . Pérez del Castillo (2001), trabajó con *Eucalyptus grandis* de 16.5 años de edad provenientes del departamento de Rivera encontró una densidad de 0.531 g / cm^3 . Doldan (2003) encontró para *E. grandis* de 18 años de edad del departamento de Río Negro una densidad media de 0.43 g / cm^3 . Medidas con probetas al 12 % de humedad.

La densidad de la madera varía dentro del árbol en dirección radial, generalmente incrementándose desde el centro del árbol hacia la corteza. También varía en altura pero las variaciones en este caso no son consistentes y dependen de las especies. En *Eucalyptus grandis* la densidad aumenta con la altura, con respecto a la variación radial, aumenta de médula a corteza. Una vez que empieza a generarse madera adulta, tiende a estabilizarse (Malan, 1991).

2.2.2.1 Variación dentro del árbol

Variación radial

La variación de la densidad básica en el radio del árbol ha sido objeto de numerosos estudios: El patrón general observado consiste en incrementos de la densidad desde la médula hacia la corteza. Los patrones observados se resumen en los siguientes grupos:

Aumento desde médula a corteza

Doldan (2003), trabajando con *Eucalyptus grandis*, encontró que la madera cercana a la médula muestra valores de densidad aparente básica menores a los cercanos a la corteza y lo atribuye al hecho de que las posiciones más cercanas a la médula están constituidas por madera juvenil, luego habría una zona de transición entre madera juvenil y adulta y las zonas más cercanas a la corteza están compuestas por madera adulta.

Este es el patrón observado con mayor frecuencia en la bibliografía. Tales resultados fueron obtenidos por Malan (1988) en árboles de 27 años y Brasil y Ferreira, (1979) en árboles de 16 años.

Chapola et al. (1990), trabajando con *Eucalyptus* spp. encontraron que para la mayoría de las especies, los menores valores de densidad (en el eje radial) en la zona central y los mayores valores en la zona periférica. Para algunas de las especies el análisis de varianza mostró diferencias no significativas, lo cual lo explican por el hecho de que la tasa de variación es variable de árbol a árbol aún dentro de la misma especie.

Decrecimiento inicial seguido de un incremento hacia la corteza

Malan (1982) observó que si bien existen variaciones entre árboles en cuanto a la relación de la densidad básica con la distancia hacia la médula, esta disminuye hasta aproximadamente cerca de la médula y luego aumenta hacia la corteza. Esta misma tendencia fue encontrada por Wilkins y Horne (1991).

Decrecimiento hacia la corteza

Brasil y Ferreira (1972) estudiando la variación radial de diversas propiedades, obtuvieron descensos de la densidad básica desde la médula a la corteza, en discos extraídos a 1.30 m de altura; observaciones que otros autores obtuvieron a alturas superiores del árbol.

La madera juvenil es la madera producida en zonas cercanas a la médula del árbol; generalmente se define como madera que se produce entre 5° y 20° anillo (depende de la especie). Esta madera presenta propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas considerablemente diferentes que la madera madura (USDA, 1999).

Variación Longitudinal

La variación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera, en sentido longitudinal, no es tan acentuada como la variación radial.

Los patrones de variación más reportados en la bibliografía son: aumento con la altura, disminución con la altura, disminución inicial y posterior incremento con la altura, y sin patrón definido.

Las variaciones en la densidad a lo largo del tallo son menos consistentes que aquellas en la variación radial. Como el cilindro de madera juvenil se extiende desde la base del tallo hasta el ápice del árbol, la proporción de madera juvenil por debajo de la mitad de la altura, se incrementa. Generalmente la densidad se incrementa con la altura, aunque en algunas situaciones pueda haber un descenso inicial (Taylor 1973, Stohr y Mackay 1983, Bhat et al. 1990).

2.2.2.2 Variación entre árboles

La variación entre los árboles es una de las mayores fuentes de variación en las propiedades de la madera, y esta responde tanto a factores ambientales como genéticos (Downes et al., 1997).

Es conocida la gran variación que existe entre los árboles de *E. grandis*; a su vez estas variaciones existen en árboles que están creciendo en un sitio uniforme. Aparentemente estas variaciones no se correlacionan confiablemente con cambios específicos en el ambiente, tales como: altitud, latitud, precipitación y propiedades del suelo. Lo anterior sugiere que una gran proporción de la variación se debe a factores genéticos.

La existencia de variabilidad en el interior de las especies es un fenómeno fácilmente perceptible; los árboles no son idénticos entre sí. Esta variación surge por los cambios en el material hereditario y es el requisito necesario para que las especies evolucionen y se adapten a nuevas condiciones permitiendo la selección de individuos en base a las diferentes expresiones de sus características genéticas. La mayoría de las características de la madera tienen una alta variación, lo que da lugar a que exista una buena selección para el establecimiento de programas de mejora genética (Zobel, 1997). Características como el peso específico tienen un alto e importante componente aditivo en su varianza.

Lima et al. (2001), trabajando con siete clones de *E. grandis* de distintas edades, encontraron una tendencia de aumento de densidad básica a medida que se incrementa la edad de los clones. La variación dentro de los clones (intraclonal) toma valores bajos, común en material clonal. Los coeficientes de variación interclonal permanecieron relativamente constantes con la edad, lo que indica que la variación de la densidad de la madera en diferentes materiales genéticos, tiende a permanecer relativamente constante con el avance de la edad (siempre que el sitio sea homogéneo).

Variación ambiental

Las propiedades de la madera dependen tanto del control genético como ambiental, pero afortunadamente la interacción genotipo x ambiente es muy pequeña para estas propiedades, excepto en aquellas condiciones en que las diferencias ambientales sean muy grandes. Esto hace que los programas de mejora genética sean más eficientes (Zobel y Talbert, 1988).

El desempeño de un clon o un grupo de clones no puede explorarse de un sitio a otro, la interacción genotipo por ambiente puede determinar que un genotipo tenga buen comportamiento en un sitio pero no en otro. Si se desea obtener el máximo progreso genético en programas de mejoramiento, hay que tener en cuenta este factor (Zobel y Talbert, 1988).

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

Variación genética

El grado de control genético de cualquier propiedad se mide por su heredabilidad, la cual es la medida cuantitativa de la herencia más comúnmente empleada. Se define como la proporción de la variación genética en el total de la varianza; expresa la importancia relativa de la constitución genética y del medio ambiente como determinantes de una característica específica de la madera.

Generalmente la heredabilidad de las propiedades de la madera cambia de la médula del árbol hacia la corteza y desde su base al ápice. El peso específico de la madera es una propiedad influenciada por múltiples características entre las cuales se citan: proporción de leño temprano y de leño tardío, grosor de la pared celular, tamaño celular, cada una tiene su propio patrón de heredabilidad, y por lo tanto lleva una combinación de todas ellas para determinar la heredabilidad del peso específico (Zobel y Talbert, 1988).

Variación con la edad.

La densidad de la madera varía con la edad, es importante conocer la magnitud y la significancia de la correlación a diferentes edades. La posibilidad de manejar la densidad de la madera a una edad temprana aceleraría el proceso de mejora genética.

Según Taylor (1984), existe una fuerte correlación entre la densidad básica de la madera juvenil y la de la madera de mayor madurez, formada hacia las zonas externas del fuste.

Tasa de crecimiento

La literatura provee información variada en cuanto a como afecta la tasa de crecimiento a la densidad de la madera, y a otras propiedades físico mecánicas de la misma. La correlación existente entre la tasa de crecimiento y las propiedades puede ser positiva, negativa o simplemente no existe interacción alguna.

Stöhr y Mackay (1983), comparando árboles de 14 años con iguales situaciones de manejo en un mismo sitio, observaron que árboles de menor crecimiento muestran una clara tendencia a tener menores valores de densidad. Destacan que los árboles de crecimiento rápido muestran mayores valores de densidad.

Malan (1988b) concluyó que seleccionar por velocidad de crecimiento, podría provocar efectos perjudiciales en la densidad de la madera y la longitud de las fibras. Un decrecimiento en la densidad de la madera reduciría la resistencia de la misma, cambiaría el comportamiento de la madera durante el secado y otras propiedades físicas.

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

2.2.3 Flexión estática y dinámica

Anteriormente se hizo referencia a que se denomina propiedades mecánicas de la madera a aquellas que indican el comportamiento resistente y elástico bajo la acción de cargas o sollicitaciones exteriores (Coronel, 1994). Una clasificación de las propiedades mecánicas se puede hacer dividiéndolas en resistentes, elásticas y de dureza (Coronel, 1996).

A su vez, dentro de las primeras se pueden considerar las estáticas y las dinámicas. Teniendo en cuenta que el objetivo perseguido es analizar a la madera como material estructural, se considerarán las propiedades resistentes estáticas y las elásticas empleadas en el diseño.

Las resistencias estáticas de la madera se determinan a través de cargas que se van aumentando en forma lenta y regular. Por lo general la velocidad de aplicación de las cargas esta establecida en las respectivas normas técnicas, y tiene por finalidad producir situaciones de características aproximadas a las que presenta una carga estática propiamente dicha. La influencia de la carga sobre la muestra esta temporalmente limitada.

Los ensayos de resistencia estática se efectúan en un lapso de minutos, de tal modo que la aplicación de la carga, no provoque efectos colaterales por la aceleración que pueda experimentar la deformación de la madera.

Los valores de las resistencias estáticas tienen una gran importancia en la aplicación de las maderas en la construcción, especialmente en el dimensionado de las piezas según su resistencia y deformación. Las más importantes y las más comunes de las resistencias estáticas son: la tracción, la compresión y pandeo, flexión, corte, torsión, y hendibilidad (Coronel, 1994).

Tanto por las aplicaciones de la madera como también por las técnicas de los ensayos de materiales que una sollicitación en forma de impacto o choque, o sea una sollicitación dinámica, ocasiona en la madera un comportamiento distinto al que produce una carga en forma estática; ello a causa de que las propiedades pueden variar según la naturaleza de las cargas y de las condiciones de trabajo a las que se halla sometida (Coronel, 1994).

Las piezas de madera sollicitadas temporalmente a cargas instantáneas, se rompen a valores de carga más altos que si estuvieran sollicitadas por cargas estáticas, como consecuencia del efecto choque que provoca este tipo de carga de impacto o golpe; siendo estas sollicitaciones aplicadas en forma dinámica, las ondas de tensión aplicadas pueden no propagarse provocando la ruptura por deformaciones localizadas. Las propiedades mecánicas de la madera sometida a efectos dinámicos o de choque se ven sensiblemente modificadas por las altas velocidades de las cargas como también de otros tipos de reacciones elásticas de la madera, aunque los mecanismos de deformación plástica, posiblemente no varíen con el modo de aplicación de la carga (Coronel, 1996).

La determinación de las propiedades mecánicas se efectúa en general a través de ensayos estáticos, que pueden no requerir de la destrucción total de la pieza, como es el caso de la obtención del módulo de elasticidad. En cambio, para conocer la tensión de rotura es necesario destruir el cuerpo de prueba.

Existen también ensayos no destructivos, orientados fundamentalmente a la determinación de las propiedades elásticas, dentro de los cuales se pueden citar el

basado en la frecuencia fundamental de vibración, propagación de ondas de ultrasonidos y de impactos, entre otros (Pérez del Castillo, 2001).

2.2.3.1 Métodos de ensayos no destructivos

Dentro de estos métodos se encuentran aquellos ensayos que pueden determinar las propiedades mecánicas de la madera o su aptitud para ciertos usos sin necesidad de llevar el material experimental a su destrucción total. En los centros tecnológicos donde se llevan a cabo este tipo de estudios, desde el punto de vista económico, los ensayos no destructivos resultan demandar menos costo.

Dentro del tema específico de la determinación de las propiedades mecánicas de la madera, la utilización de estos métodos de ensayo consiste en realizar pruebas sobre muestras de madera donde se mide una serie de magnitudes físicas, calculándose primero el módulo de elasticidad, que está relacionado con las diferentes propiedades mecánicas a través de diferentes correlaciones estadísticas (Coronel, 1996).

Los métodos de ensayos no destructivos son muy variados. En pruebas sobre maderas se emplean normalmente los sónicos y los ultrasónicos.

2.2.3.2 Métodos de ensayo destructivos

Comprenden todos aquellos ensayos, en los cuales las muestras se someten a cargas crecientes hasta alcanzar un estado límite que puede provocar la rotura de la madera, o bien su agotamiento, lo que se traduce posteriormente en la imposibilidad de usarla nuevamente (Coronel, 1996).

El estado de rotura implica haber superado las fuerzas de cohesión de la madera. Para el estado de agotamiento se refiere al hecho de que por defectos de los ensayos, la madera ha sufrido deformaciones de tal magnitud que prácticamente la inutilizan para desempeñarse como tal.

En ensayos destructivos se obtiene información muy completa. No solamente son las características mecánicas las que contribuyen a integrar esta información, sino también los datos referidos a la rotura misma, que constituyen un elemento muy valioso para juzgar las maderas en lo que hace a la heterogeneidad, forma de la rotura, y presencia de anomalías (Coronel, 1996).

Este tipo de ensayos requieren de maquinaria muy compleja y costosa, además se debe destruir el material de ensayo lo que se traduce a que sea más costoso que los ensayos no destructivos.

2.2.3.3 Módulo elástico (MOE)

El módulo elástico mide la capacidad de un material de recuperar su forma luego de ser sometido a un esfuerzo. La definición académica define al módulo de elasticidad como la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud, lo cual constituye una medida de flexibilidad del material. Esta propiedad, al igual que las otras, se encuentra también afectada por la anisotropía de la madera que se describió en los párrafos anteriores. Por lo tanto esta propiedad tendrá una magnitud diferente según la dirección en que esta se mida (Coronel, 1996).

La anisotropía ya descrita es la que origina resultados muy diferentes para las propiedades en función de la dirección del esfuerzo respecto de la orientación de las fibras. A los fines prácticos, la mayoría de los valores mecánicos se expresan solamente en la dirección longitudinal y en la transversal, resumiendo en esta última tanto la radial como la tangencial.

De las propiedades empleadas en el diseño estructural, ya mencionadas, y que por lo tanto deben ser consideradas en la clasificación por resistencia adquieren valores mucho mayores en la dirección de las fibras que en la transversal. La explicación se encuentra en la estructura de la pared celular, como se expresó con anterioridad.

La presencia de anomalías ligadas al crecimiento, como los nudos y la desviación de las fibras, las originadas en los procesos de secado y producción, como las fisuras, y los ataques biológicos, entre otros, afectan las propiedades mecánicas en general, pero en algunos casos con distinto nivel de importancia. La presencia de nudos tiene mayor influencia en las zonas sometidas a tracción que a compresión (Glos, 1995a).

Las prescripciones modernas fijan condiciones de ensayo normalizadas que tienen por objetivo obtener resultados comparables en el nivel internacional. Dentro de ellas se encuentra un contenido de humedad de referencia igual a 12%, que requiere un acondicionamiento previo de los cuerpos de prueba en una cámara que reúna las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente correspondientes. La precisión requerida habitualmente para las determinaciones es del 1% y se encuentra establecida la velocidad de aplicación de las cargas, que debe ser constante, y el tiempo de duración del ensayo hasta la rotura.

Pérez del Castillo (2001) indica que la estimación del módulo elástico mediante el método basado en la frecuencia fundamental de vibración (*FFT analyzer*) es estadísticamente igual al obtenido en la máquina universal para piezas con un 12% de humedad. En el mismo trabajo el autor encuentra un aumento de un 5% en el valor de MOE cuando las piezas pasan de 26% a 12% de humedad.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, la madera juvenil tiene un efecto sobre la densidad. Por lo tanto Pérez del Castillo (2001) separó las piezas bajo estudio en piezas que contenían mayor proporción de madera juvenil y médula, las cuales fueron extraídas de la parte central de la troza. Piezas que tenían un contenido intermedio de madera juvenil por ser las piezas extraídas de una parte no tan central como las anteriores y piezas extraídas de la parte más externa de las trozas, en las cuales el contenido de madera juvenil sería muy bajo. El autor indica que, con un 95% de confianza puede decirse que existen diferencias significativas entre las tres categorías de piezas en cuanto a la magnitud del MOE. Las piezas más externas, las que presentaban un mayor porcentaje de madera adulta presentaban un mayor valor de MOE y una menor variabilidad del mismo, mientras que las piezas que contenían mayor proporción de madera juvenil presentaban menores valores de MOE y mayor variabilidad.

En el mismo trabajo Pérez del Castillo encontró una correlación entre los valores de MOE de las piezas de tamaño de obra con las probetas libres de defectos que se extrajeron de estas últimas de $r = 0.732$.

2.2.3.4 Módulo de rotura (MOR)

Cuando sobre un cuerpo de madera, el esfuerzo sobrepasa el límite elástico, se producen perturbaciones en el interior de la estructura y se ponen de manifiesto procesos de escurrimiento de las sustancias que forman la estructura micelar de la madera o procesos visco-elásticos, que en primera instancia solo ocasionan una deformación no proporcional al esfuerzo. Una posterior elevación del esfuerzo estará en relación con la composición y las diferentes sustancias estructurales del interior de la madera, hasta que el cuerpo se rompe; llamándose este límite esfuerzo de rotura a la carga total aplicada.

Este valor máximo de esfuerzo se designa resistencia de la madera y está indicado por la carga máxima que actúa sobre la unidad de superficie de la sección transversal de la madera utilizada (en Kg cm^{-2} o N.mm^{-2}).

Al aplicarle una fuerza perpendicular al eje longitudinal a una pieza, esta se deforma tomando una curvatura cóncava en el lugar de aplicación de la fuerza. En esta parte de la pieza las fibras se acortan, mientras que en la parte inferior las mismas se alargan ya que en este lugar la pieza toma una curvatura convexa, a su vez en el eje longitudinal las fibras permanecen iguales. La deformación es máxima en la parte externa de la pieza y va disminuyendo a medida que se acerca al eje longitudinal donde finalmente se anula, volviendo a aumentar pero en sentido contrario hacia el otro extremo de la sección. La capa de fibras que no sufre deformación se conoce como capa neutra. Entonces las tensiones serán variables, encontrándose una tensión máxima de compresión en la capa superior de fibras, una tensión máxima de tracción en la capa inferior de fibras y una nula en la capa neutra (Coronel, 1996).

Como se menciono en los párrafos anteriores las propiedades físicas tienen influencia en el módulo de rotura. Entre estas propiedades debemos destacar que el aumento del peso específico aparente produce un aumento en el módulo de rotura. Pérez del Castillo (2001) encontró una correlación de 0,825 entre la densidad y el MOR. En el mismo estudio encontró que las piezas con mayor contenido de madera adulta presentaban valores mayores también para módulo de rotura y una menor variabilidad que las piezas que se obtuvieron de la parte más cercana a la médula, es decir las que tenían mayor proporción de madera juvenil.

Estos resultados también pueden estar explicados por la presencia de mayor cantidad de defectos en esta madera ya que las diferencias mencionadas se presentaron solo para las piezas más cercanas a la médula pero no hubo diferencias entre las piezas más externas con las piezas intermedias. En este trabajo el autor también estudió el MOR con probetas libres de defectos extraídas de las piezas de tamaño de obra. La correlación entre estos valores fue del orden de 0.362, lo cual muestra el efecto que producen los defectos en los valores de esta propiedad. Se debe destacar el efecto que tiene sobre esta propiedad el defecto conocido como corazón quebradizo, el cual provoca una fuerte disminución en el valor de esta propiedad.

2.2.3.5 Resistencia al impacto

Mientras que para los ensayos de MOE y MOR la carga se aplica en forma lenta, para el ensayo de esta propiedad se requiere de una carga instantánea para estudiar el comportamiento plástico de la madera. Debido a lo instantáneo de esta sollicitación la tensión generada no se propaga provocando la rotura de la madera. El ensayo consiste en medir la capacidad de la madera de absorber y disipar la energía producida por un determinado impacto.

Fundamentalmente, los métodos para determinar las resistencias dinámicas de la madera están basados en los ensayos de impacto, los que son ejecutados a través de un martillo – péndulo de caída libre y también por medio de la caída vertical de un martillo; con ello se determina la capacidad de la madera para absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario para producir la rotura de la muestra de madera de un solo impacto, o de varios en el caso del martillo de caída vertical. En la madera, se determina normalmente la resistencia dinámica a través del ensayo denominado flexión dinámica.

Esta propiedad también se ve afectada por el peso específico aparente, aumentando su valor a medida que aumenta este último. En cambio esta propiedad no presenta variaciones en su valor con las variaciones del contenido de humedad. Por otro lado la desviación de las fibras con respecto al eje longitudinal produce una marcada disminución del valor de esta propiedad (Coronel, 1996).

Para *Pinus elliotii* del litoral del Uruguay, se encontró un aumento de la resistencia al impacto con el incremento de la distancia en el radio. No encontró un patrón claro de variación para esta propiedad con el incremento de altura (Bothig, 2001). El mismo grupo de trabajo, 2003 encontró un valor medio de 5,5 J.cm⁻², con un desvío estándar de 2.01 para *E. grandis* del Río Negro.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Material experimental

El material a ensayar se colecto en dos plantaciones diferentes, las cuales se describen a continuación:

La plantación de Rivera de donde se seleccionaron 25 árboles presentaba las siguientes características: *Eucalyptus grandis*, localidad de Batovi Dorado, se planto en primavera de 1984 a una densidad de 1111 árboles por hectárea. El origen de la semilla es Bañado Medina y los suelos de plantación pertenecen al grupo CONEAT 7.31. A esta plantación se le realizaron dos raleos, el primero a los 9.5 años de edad dejando una densidad remanente de 500 árboles por hectárea, el segundo se realizó a los 15.7 años de edad dejando una densidad remanente de 200 árboles por hectárea.

La plantación de Durazno de la que se seleccionaron 30 árboles presentaba las siguientes características: fue plantada en 1976 a una densidad de 1111 árboles por hectárea, el origen de la semilla es Concordia, los suelos en los cuales se encontraba eran del grupo CONEAT 8.8. La plantación se sometió a un raleo a la edad de 22 años dejando una densidad remanente de 250 árboles por hectárea.

Se utilizaron 233 tablas de la plantación de Rivera con las siguientes dimensiones: 2800 mm de longitud, 150 mm de ancho y 50mm de espesor. De la plantación de Durazno se utilizaron 223 tablas de las mismas dimensiones.

3.2 MÉTODOS

De cada una de estas plantaciones se seleccionaron árboles con determinadas características. Cada uno de esos árboles fueron apeados y se obtuvieron tres trozas de 4 metros de largo de cada ejemplar. A continuación se detallan la cantidad de árboles seleccionados por clase diamétrica para cada plantación:

Cuadro N° 1. Numero de individuos y DAP medio por clase diamétrica para la plantación de Rivera.

Clase diamétrica		Número	DAPc/c
	Rango (cm)	Individuos	Medio (cm)
1	34 - 38	8	36
2	39 - 44	9	42
3	45 - 57	8	51

Referencias: DAP diámetro a 1.30 m de altura, c/c con corteza

Cuadro N° 2. Número de individuos y DAP medio por clase diamétrica para la plantación de Durazno.

CLASE DIAMÉTRICA	Rango (cm)	Numero Individuos	DAP C/C Medio (cm)
1	41 -48	9	45
2	49 - 53	13	52
3	53 - 64	8	56

Referencias: DAP diámetro a 1.30 m de altura, c/c con corteza

De cada troza se obtuvieron la máxima cantidad de tablas posibles con las siguientes dimensiones, 280 mm de longitud 50 mm de espesor y 150 mm de ancho. Las tablas se identificaron según: el árbol y la troza de donde fueron extraídas Estas tablas se dividieron en tres categorías según su cercanía a la médula: BA, B, C según se muestra en la figura N° 5:

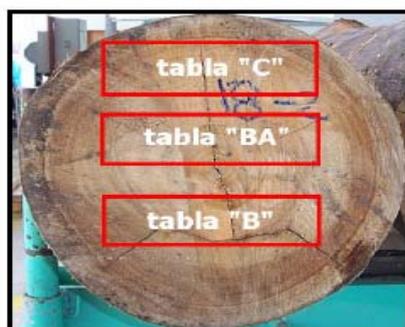


Figura N°5: Clasificación de tablas según ubicación con respecto a la médula.

En la figura N° 6 se muestra un ejemplo de la distribución en altura de las trozas obtenidas.

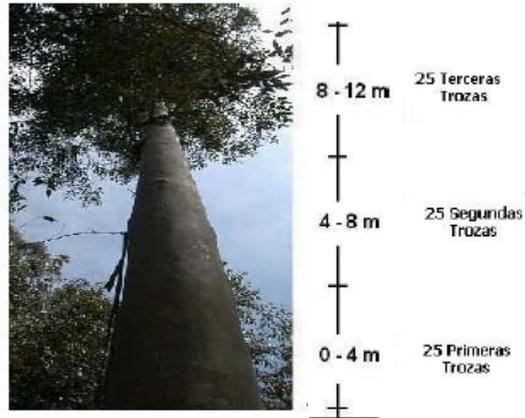


Figura N° 6 : Ejemplo de distribución en altura de las trozas.

En los cuadros N° 3 y N° 4 se observa la distribución del número de piezas tanto en altura como en radio.

Cuadro N° 3. Clasificación de tablas por ubicación en altura por muestreo.

Durazno		Rivera	
1	36	1	76
2	97	2	80
3	90	3	77
n	223	n	233

Referencias:

- 1: Troza de 0-4 m de altura
- 2: Troza de 4-8 m de altura
- 3: Troza de 8-12 m de altura
- n: número de tablas

Cuadro N° 4. Clasificación de tablas por ubicación en radio por muestreo.

Durazno		Rivera	
BA	72	BA	74
B	72	B	67
C	79	C	91
SR	0	SR	1
n	223	n	233

Referencias:

- BA: Tablas de posición más interna
- B: Tablas de posición intermedia
- A: Tablas de posición más externa

3.2.1 Clasificación visual

Se realizaron tres clasificaciones visuales a las tablas B y C de ambas plantaciones. El objetivo que persiguen estas clasificaciones es analizar la calidad que presenta la madera de *Eucalyptus grandis* de estas plantaciones para la confección de muebles. Estas clasificaciones visuales están orientadas al porcentaje de madera libre de defectos de cada pieza y a las dimensiones de esas piezas libres de defectos. Es importante destacar que estas clasificaciones no presentan antecedentes para *Eucalyptus* por lo tanto fue necesario realizar ciertas adaptaciones a la norma utilizada.

Las tres clasificaciones visuales fueron adaptadas de las normas JAS para tablas, a pesar de que la relación entre ancho y espesor no es 4 o más que es lo que exige esta norma. Esta norma tiene tres clases: una clase “especial”, una clase “primera” y una clase “segunda”. A estas se decidió agregar una nueva clase: “tercera”, ya que para esta especie hay tecnologías que permiten trabajar con dimensiones menores a las de la categoría segunda.

Por lo tanto, en la primera clasificación las piezas tamaño de obra se agruparon en cuatro categorías: especial, primera, segunda y tercera. Como ya se mencionó, según la Norma JAS para tablas existen solo tres categorías, en este caso al tratarse de madera sin podas, se consideró una cuarta categoría (piezas de “tercera”) debido a que un porcentaje importante de la madera quedaba en esa categoría.

La división entre cada categoría se realizó según el porcentaje de superficie *clear* y las dimensiones de las plantillas *clear*. De esta manera la clase especial tiene un 90% o más de superficie libre de defecto, además de cada pieza se obtiene una sola tabla. La categoría primera abarcaba tablas con superficies *clear* entre 66% y 89% y no se obtiene más de dos tablas. La categoría segunda tablas entre 50% y 65% de superficie *clear*. Las de tercera presentaban menos de un 50% de superficie *clear*. Se consideró como defectos: nudos, rajaduras, colapso, agrietamientos, pudriciones, ataques de insectos, curvaturas y torceduras.

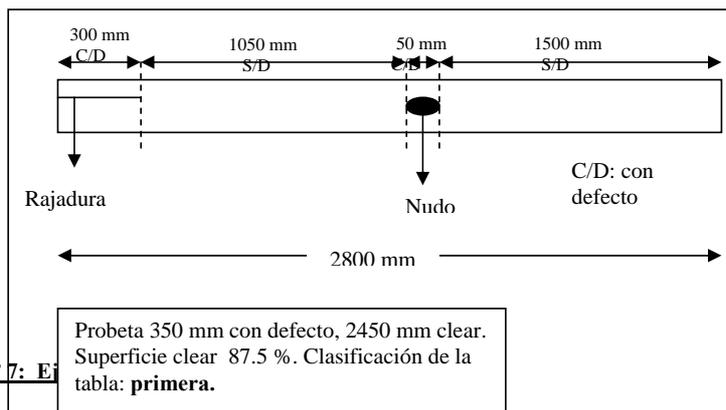
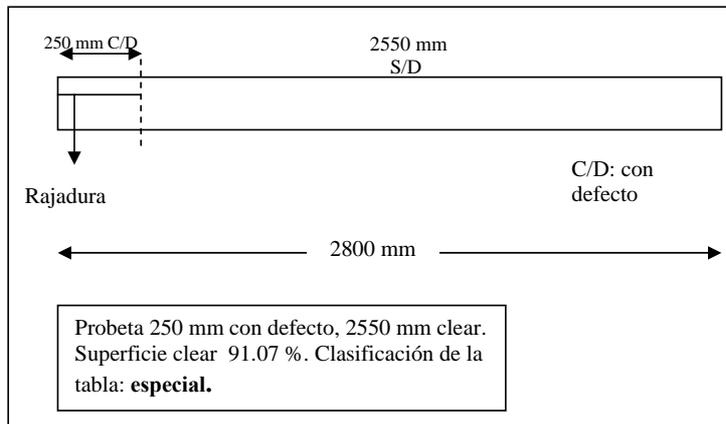


Figura N° 7: Ej

La medición de la superficie con defectos se realizó en la cara con mayor cantidad de defectos. De la superficie de la tabla se marcó el defecto abarcando todo el ancho de la tabla con un largo equivalente al defecto, como si la tabla se re-aserrara conservando el mismo ancho, esta superficie se descontó de la superficie total de la tabla. Para facilitar la comprensión se muestra un ejemplo en la figura N° 7.

La segunda clasificación consiste en la utilización de plantillas de tamaños predeterminados para determinar el área libre de defectos de cada pieza. Las plantillas poseen diferentes medidas tanto de ancho como de largo. En longitud las medidas van desde 35 a 280 cm., pasando de una plantilla a otra de a 10 cm, menos las primeras medidas que son: 35, 40, 45, 50, 55 y 60 cm. Las medidas de ancho de las plantillas van desde 30mm a 150 mm y van aumentando cada 10 mm (cuadro n° 5).

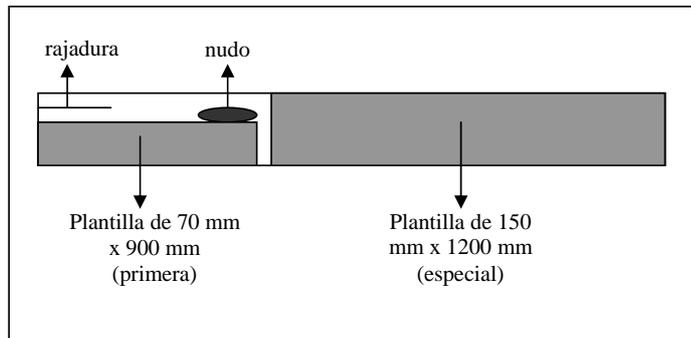


Figura N° 8. Ejemplo en segunda clasificación visual

En cada probeta se marcaron diferentes plantillas. Las categorías de las probetas en esta clasificación visual son las siguientes: especial con una superficie *clear* desde 600 a 4200 cm². Las piezas de primera abarcan desde 720 a 2520 cm² de superficie *clear*. Las de segunda desde 480 a 1960 cm², finalmente las de tercera desde 1400 cm² hasta 300 cm².

Como se puede apreciar en el párrafo anterior, las clases se superponen en cuanto a la superficie libre de defectos. Esto se debe a que no solo se tiene en cuenta la superficie libre de defectos, sino que también se prioriza en la utilización de las plantillas de mayor tamaño. Esto es el concepto "*clear cutting*", donde frente a una tabla tamaño real, es mejor sacar una plantilla *clear* de mayores dimensiones (plantilla especial por ejemplo) que sacar muchas plantillas de menores dimensiones (plantillas segunda por ejemplo).

En la figura N° 8 se observa un ejemplo, y en el cuadro N° 5 se muestran las diferentes clasificaciones de plantillas diferenciadas en 5 zonas, diferenciadas por el color. Las plantillas "especial" son las que tienen más de 60 cm de largo y más de 100 mm de ancho, representadas en el cuadro con el color celeste. Las plantillas de la clase "primera", tienen un largo mayor a 90 cm y por lo menos tienen un ancho de 80 mm, representadas en el cuadro con el color turquesa. Al momento de catalogar a qué clase corresponde cada tabla, se toma en cuenta la superficie libre de defectos y el tipo de plantillas utilizadas.

La tercera clasificación visual es similar a la segunda en el sentido de que también utiliza plantillas. La diferencia radica en que el canto de la probeta es dividido en su ancho a la mitad, para posteriormente realizar la clasificación visual en cada mitad del canto. Las plantillas utilizadas son las mismas, pero en esta clasificación no hay tablas de la categoría especial debido a que no pueden haber plantillas con un ancho mayor a 70 mm. La categoría primera abarca desde 720 a 1960 cm², la segunda desde 480 a 700 cm² y la tercera desde 105 a 480 cm². En la figura n° 9 se esquematiza un ejemplo.

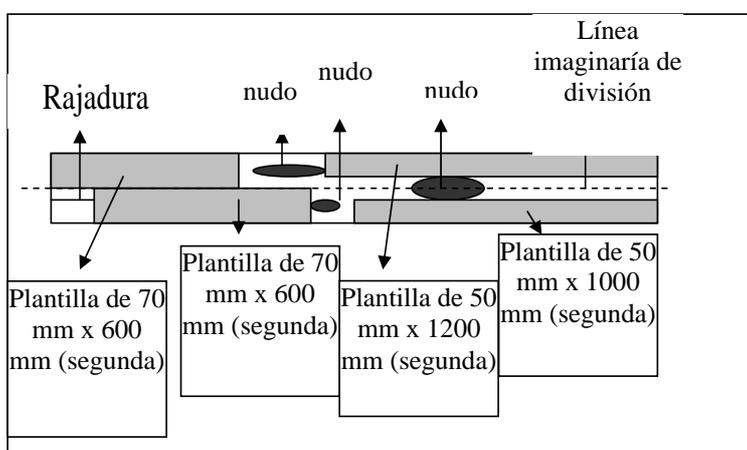


Figura N°9: Ejemplo de tercer clasificación visual.

Cuadro N° 5. Categoría de las piezas según superficie clear y dimensiones de las mismas.

Largo Ancho	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280
30	105	120	135	150	165	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750	780	810	840
40	140	160	180	200	220	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600	640	680	720	760	800	840	880	920	960	1000	1040	1080	1120
50	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
60	210	240	270	300	330	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440	1500	1560	1620	1680
70	245	280	315	350	385	420	490	560	630	700	770	840	910	980	1050	1120	1190	1260	1330	1400	1470	1540	1610	1680	1750	1820	1890	1960
80	280	320	360	400	440	480	560	640	720	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160	2240
90	315	360	405	450	495	540	630	720	810	900	990	1080	1170	1260	1350	1440	1530	1620	1710	1800	1890	1980	2070	2160	2250	2340	2430	2520
100	350	400	450	500	550	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
110	385	440	495	550	605	660	770	880	990	1100	1210	1320	1430	1540	1650	1760	1870	1980	2090	2200	2310	2420	2530	2640	2750	2860	2970	3080
120	420	480	540	600	660	720	840	960	1080	1200	1320	1440	1560	1680	1800	1920	2040	2160	2280	2400	2520	2640	2760	2880	3000	3120	3240	3360
130	455	520	585	650	715	780	910	1040	1170	1300	1430	1560	1690	1820	1950	2080	2210	2340	2470	2600	2730	2860	2990	3120	3250	3380	3510	3640
140	490	560	630	700	770	840	980	1120	1260	1400	1540	1680	1820	1960	2100	2240	2380	2520	2660	2800	2940	3080	3220	3360	3500	3640	3780	3920

- Clase “especial”
- Clase “primera”
- Clase “segunda”
- Clase “tercera”
- S/C

3.2.2 Módulo de elasticidad, método no destructivo.

Luego de realizar la clasificación visual se procedió a la realización del ensayo con *FFT analyzer* para la determinación del módulo elástico. Este es un dispositivo que analiza la frecuencia de vibración que produce un martillo en un extremo de la pieza y que es captada por un micrófono en el otro extremo. Como se muestra en la figura N° 10.



Figura N° 10: Disposición del *FFT analyzer* para la realización del ensayo.

Del valor de frecuencia de vibración longitudinal que proporciona este dispositivo se calcula el valor de módulo elástico mediante la siguiente formula:

$$E_{ft} = 4 * L^2 * f_l^2 * D / g ; \text{ dónde}$$

E_{ft} : Módulo elástico calculado por vibración longitudinal,

L : Largo de la pieza,

f_l : Frecuencia de vibración longitudinal,

g : Constante de aceleración gravitacional,

D : Densidad al 12% de humedad

La densidad se calculó midiendo las dimensiones con un calibre para el espesor y el ancho y una cinta métrica para el largo con un contenido de humedad del 12%. De cada pieza se tomaron dos medidas en cada extremo para el espesor y el ancho las cuales se promediaron. La masa fue medida en una balanza marca AND fw 300 con apreciación de 1 gramo. De esta manera la densidad se calculó con la siguiente formula:

$$D = v / p ; \text{ dónde}$$

D : densidad con 12% de humedad,
 V : volumen,
 p : masa.

3.2.3 Módulos de elasticidad y rotura, método destructivo

El módulo de elasticidad y el módulo de rotura fueron medidos en la máquina universal marca: Minebea, modelo: AL-250 kNB. Las piezas fueron sometidas a un esfuerzo de flexión en 4 puntos, con una separación entre apoyos inferiores de 2520 mm y una separación de 840 mm en el esfuerzo que se le aplicó en el canto superior, como se muestra en la figura N° 11. La carga se realizó en el canto que presentaba menor cantidad de defectos.

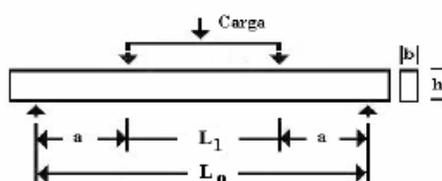


Figura N° 11: Esquema de disposición de las cargas en la pieza.

Según las normas ASTM D198, que fueron la normativa con la que se realizaron estos ensayos, la luz (distancia entre apoyos inferiores) para ensayo de flexión estática en 4 puntos, se calcula como 18 veces h (altura de la probeta) $18 \times 0.15 \text{ m} = 2.70 \text{ m} + 0.20 \text{ m}$ (para apoyos) = 2.90 m. Para la distancia de los apoyos superiores se calcula como 6 veces h $(6 \div 3) \times 0.15 \text{ m} = 0.90 \text{ m}$ (1/3 de la luz). En los ensayos realizados por un tema del largo de las trozas de donde se obtuvieron las vigas se calculó de la siguiente manera:

- Luz (L_0) = 16.8 h (h 150 mm) = 2520 mm
- Apoyo superior (L_1) $1/3 \text{ luz}$ $2520 / 3 = 840 \text{ mm}$

El cálculo de los valores de MOE y MOR se realizó bajo las condiciones especificadas por la norma ASTM D198, mediante las siguientes formulas:

$$\text{MOE} = \frac{\Delta P \cdot (L_0 - L_1) / 2 \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y} ; \text{ dónde}$$

MOE : módulo elástico,
 ΔP : diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional,
 L_0 : distancia entre los apoyos inferiores,
 L_1 : distancia entre los apoyos de la carga,
 I : momento de inercia,

Δ y : diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

El momento de inercia (I) se calcula como :

$$I = b * h^3 / 12 ; \text{ d\u00f3nde}$$

I : momento de inercia,
b : espesor de tabla,
h : altura de tabla.

El MOR (m\u00f3dulo de rotura) se calcula como :

$$MOR = 3 * P * (I-a) / 2 * b * h^2; \text{ d\u00f3nde}$$

P : carga m\u00e1xima,
I : distancia entre apoyos inferiores,
a : distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior m\u00e1s pr\u00f3ximo,
b : espesor de la tabla,
h : altura de la tabla.

3.2.4 Ensayos con probetas libres de defectos

3.2.4.1 Flexi\u00f3n est\u00e1tica en probetas libres de defectos

Las peque\u00f1as probetas libres de defectos para los ensayos de flexi\u00f3n din\u00e1mica y est\u00e1tica fueron obtenidas de las piezas de tama\u00f1o de obra luego de que se realiz\u00f3 el ensayo destructivo para MOE Y MOR. Los ensayos en peque\u00f1as probetas fueron realizados solamente para la plantaci\u00f3n de Durazno.

Se obtuvieron 223 probetas de 25 mm x 25 mm x 400mm de longitud para flexi\u00f3n est\u00e1tica, seg\u00fan la norma Jis Z 2101-1994 "*Method of bending test for wood*". Estas probetas fueron confeccionadas con una orientaci\u00f3n perpendicular a los anillos de crecimiento y paralelos a los radios. La carga se aplic\u00f3 sobre la cara radial. Las probetas se acondicionaron en una c\u00e1mara a 20\u00b0 C y 65 % de humedad, con estas condiciones se logra una humedad de equilibrio del 12 %.

Tambi\u00e9n se obtuvieron probetas *clear* para determinar el contenido de humedad con las siguientes dimensiones: 40 mm x 50 mm x 150 mm de longitud. Las mismas estaban orientadas de manera transversal a la longitud de la pieza. Las probetas fueron pesadas y medidas en sus tres dimensiones, de donde se obtuvo el volumen. Luego fueron secadas en estufa a 103\u00b0 +/- 2\u00b0 C hasta peso constante para obtener peso anhidro.

Los c\u00e1lculos y los procedimientos para la estimaci\u00f3n del CH y de la densidad de las peque\u00f1as probetas fueron realizados por personal del LATU. El c\u00e1lculo y el

procedimiento se realizó según la norma ASTM D2395, method A. Para el cálculo se utilizaron las siguientes formulas:

$$D_{\text{corriente}} = P_{\text{anh.}} / V_{\text{corriente}}; \text{ dónde}$$

$D_{\text{corriente}}$: densidad corriente (g/cm^3),

$P_{\text{anh.}}$: peso anhidro (g),

V : volumen a 12 % de CH.

$$CH = (P_{\text{corriente}} - P_{\text{anh.}}) / P_{\text{anh.}} * 100; \text{ dónde}$$

CH : contenido de humedad (%),

$P_{\text{corriente}}$: Peso corriente (g),

$P_{\text{anh.}}$: peso anhidro (g),

Para el ensayo de flexión estática la carga se ejerció en la cara radial y en el centro de la probeta, con una separación entre apoyos de 350 mm. Estas son las especificaciones de la norma JIS Z 2113, según la figura N° 12:



Figura N° 12: Esquema de aplicación de carga para probetas libres de defectos.

Las formulas para la determinación de MOE y MOR son las siguientes:

$$MOE = \Delta P * I^3 / 4 * \Delta y * b * h^3; \text{ dónde}$$

MOE : módulo elástico,

ΔP : diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional,

I : distancia entre apoyos inferiores,

Δy : diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional,

b : espesor de la probeta,

h : altura de probeta.

$$MOR = 3 * P * I / 2 * b * h^2; \text{ dónde}$$

P : carga máxima,

I : distancia entre apoyos inferiores,

b : espesor de la tabla,

h : altura de la tabla.

3.2.4.2 Flexión dinámica en probetas libre de defectos

Se obtuvieron 223 probetas de 20 mm x 20 mm x 300 mm de longitud para flexión dinámica. El ensayo fue realizado en un péndulo marca Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se realizó de manera de que este se produjera en el centro de la probeta con una orientación en la cara radial, como se puede ver en la Figura N° 13:



Figura N° 13: Disposición de la probeta libre de defectos para el ensayo de flexión dinámica.

La norma utilizada es la JIS Z 2116 “Method of impact bending test for wood”, la cual utiliza la siguiente formula para el calculo de resistencia a la flexión dinámica:

$$RI = E / b \cdot h; \text{ dónde}$$

RI : resistencia al impacto (J /cm²),

E : Energía absorbida (J),

b : espesor de la probeta (cm),

h : altura de la probeta (cm).

3.2.5 Análisis estadístico

Los datos del muestreo fueron procesados usando el paquete estadístico SAS versión 9.1 (SAS Institute, Cary, NC, 2005). Se realizaron análisis de varianza y para estudiar el efecto de diferentes fuentes de variación sobre las diferentes variables estudiadas. Las medias de los efectos significativos, fueron separadas usando el test de Tukey. También se estimaron las correlaciones entre las diferentes métodos de medir las variables bajo estudio, y se construyeron intervalos de confianza para los coeficientes de correlación poblacionales

Comentario [Javier1]: No es una cita

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico de las variables estudiadas. Para el análisis se utiliza como supuesto que todas las variables presentan una distribución normal. Primero se presentan los parámetros descriptivos más importantes de las variables. Luego se presenta un análisis de las medias y una comparación de medias para las diferentes variables de cada plantación. Debido a las diferencias entre ambas plantaciones en lo que respecta a edad, sitio, manejo y origen genético se opta por realizar un análisis separado de las mismas para separar estas diferencias.

4.1 PARÁMETROS DESCRIPTIVOS

4.1.1 Clasificación Visual

A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las tres clasificaciones visuales realizadas. Para cada tipo de tabla se asigna un puntaje, por ejemplo en el caso de la clasificación visual uno, a la tabla especial se le asigna un valor 4 a la tabla de primera se le asigna el valor 3 y así sucesivamente.

4.1.1.1 Clasificación visual 1

En el cuadro N° 6 se presenta la media y desvío para cada una de las plantaciones. Esta media se calculó, como se explico en el párrafo anterior, asignándole valores a cada tipo de pieza.

Cuadro N° 6: Media y desvío para cada plantación (CV 1).

Localidad	N	Media	Desvío	Mínima	Máxima
Durazno	90	2.22	0.61	1	4
Rivera	107	2.09	0.87	1	4

Se observa en el cuadro N° 6 que los valores de las medias para las dos plantaciones se encuentra en el entorno de 2 lo que corresponde a las tablas de segunda. En el cuadro N° 7 se presenta las frecuencias y porcentajes de cada tipo de tabla para las dos plantaciones.

Cuadro N° 7: Frecuencias y porcentajes para las dos plantaciones (CV 1).

Categoría	Parámetros	Durazno	Rivera	Total
Especial	Frecuencia	1	11	12
	Porcentaje	0.51	5.58	6.09
Primera	Frecuencia	26	13	39
	Porcentaje	13.2	6.6	19.8
Segunda	Frecuencia	55	58	113
	Porcentaje	27.92	29.44	57.36
Tercera	Frecuencia	8	25	33
	Porcentaje	4.06	12.69	16.75
Total	Frecuencia	90	107	197
	Porcentaje	45.69	54.31	100

Como se puede observar en el cuadro N° 7 para las dos plantaciones se observa una mayor frecuencia y un mayor porcentaje en la categoría de tablas de segunda. La categoría que le sigue en importancia es la de piezas de primera para el caso de la plantación de Durazno y de tercera para Rivera. También se observa que en la plantación de Rivera se obtienen mayor cantidad de piezas que se encuentran en la categoría especial. La frecuencia representa en número de tablas para cada clase observados correspondientes a cada plantación y los porcentajes representan el porcentaje de esa clasificación respecto a los totales observadas.

4.1.1.2 Clasificación visual 2

En el cuadro N° 8 se presenta la media y desvío para cada una de las plantaciones. Esta media se calculó, como se explicó en el principio del apartado, asignándole valores a cada tipo de plantilla.

Cuadro N° 8: Media y desvío para cada plantación (CV 2).

Localidad	N	Media	Desvío	Mínima	Máxima
Durazno	490	2.41	1.53	0	4
Rivera	382	2.13	1.47	0	4

Al igual que en la clasificación anterior la media se ubica en la categoría de tablas de segunda aunque presenta mayores valores que en la anterior. En el cuadro N° 9 se presentan las frecuencias y porcentajes para ambas plantaciones.

Cuadro N° 9: Frecuencias y porcentajes para Durazno y Rivera (CV 2).

Categoría		Durazno	Rivera	Total
Especial	Frecuencia	158	82	240
	Porcentaje	18.12	9.4	27.52
Primera	Frecuencia	124	103	227
	Porcentaje	14.22	11.81	26.03
Segunda	Frecuencia	79	76	155
	Porcentaje	9.06	8.72	17.78
Tercera	Frecuencia	17	27	44
	Porcentaje	1.95	3.1	5.05
S/C	Frecuencia	112	94	206
	Porcentaje	12.84	10.78	23.62
Total	Frecuencia	490	382	872
	Porcentaje	43.35	33.03	100

En el cuadro N° 9 se observa que la categoría de mayor frecuencia es la de piezas “especiales”, seguida de las de “primera” para la plantación de Durazno; y de “primera” seguida de las plantillas “sin clasificación” para la plantación de Rivera. La frecuencia representa en número de plantillas para cada clase observados en las tablas correspondientes a cada plantación y los porcentajes representan el porcentaje de ese número de plantillas de esa clasificación respecto a las plantillas totales observadas.

4.1.1.3 Clasificación visual 3

En el cuadro N° 10 se presenta la media y desvío para cada una de las plantaciones. Esta media se calculó, como se explico en el principio del apartado, asignándole valores a cada tipo de plantilla.

Cuadro N° 10: Media y desvío para cada plantación (CV 3).

Localidad	N	Media	Desvío	Mínima	Máxima
Durazno	539	2.39	0.78	1	3
Rivera	563	2.25	0.88	1	3

Al igual que en la clasificación 2 la media se ubica en la categoría de tablas de segunda aunque presenta mayores valores que en la anterior. En el cuadro N° 11 se presentan las frecuencias y porcentajes de ambas plantaciones.

Cuadro N° 11: Frecuencias y porcentajes para las Durazno y Rivera (CV 3).

Categoría		Durazno	Rivera	Total
Primera	Frecuencia	100	164	264
	Porcentaje	9.07	14.88	23.95
Segunda	Frecuencia	128	96	224
	Porcentaje	11.62	8.71	20.33
Tercera	Frecuencia	311	303	614
	Porcentaje	28.22	27.5	55.72
Total	Frecuencia	539	563	1102
	Porcentaje	48.91	51.09	100

Como se observa en el cuadro N° 11 en esta clasificación no se encuentran tablas en la categoría especial. Para ambas plantaciones la categoría de plantillas de tercera es la que presenta mayores frecuencias y porcentajes. La frecuencia representa en número de plantillas para cada clase observados en las tablas correspondientes a cada plantación y los porcentajes representan el porcentaje de ese número de plantillas respecto a las plantillas totales observadas.

4.1.1.4 Comparación entre poblaciones

En el cuadro N° 12 se presentan los porcentajes medios de superficie libre de defectos para cada una de las clasificaciones y para cada plantación.

Cuadro N° 12: Porcentajes medios de madera clear por localidad y clasificación

Localidad	% sup clear cv1	% sup clear cv2	% su clear cv3
Durazno	64.5	75.5	76.2
Rivera	76.8	74.6	86.0

En el cuadro N° 13 se presentan los límites del intervalo de confianza de las tres clasificaciones para el porcentaje de madera libre de defectos en las dos plantaciones con un 95% de confianza.

Cuadro N° 13: Límites de intervalos de confianza para el 95% de cada clasificación y localidad.

	% sup clear 1		% sup clear 2		% sup clear 3	
	LI	LS	LI	LS	LI	LS
Durazno	57.6	64.5	71.9	75.5	73.3	76.2
Rivera	73.4	80.2	72.0	77.2	84.2	87.8

En el cuadro N° 13 se puede observar que para el caso de la clasificación 1 la plantación de Rivera es estadísticamente mejor que la de Durazno. Para la clasificación 2 no se encuentran diferencias significativas entre ambas plantaciones. Para la clasificación 3 la plantación de Rivera es superior a la de Durazno en cuanto al porcentaje de superficie libre de defectos.

Si se comparan las clasificaciones para cada plantación, se observa que para el caso de Durazno con la clasificación 1 se obtiene menor porcentaje de madera libre de defectos que con las otras dos clasificaciones. Para la plantación de Rivera la clasificación 3 es la que permite obtener un mayor porcentaje de madera libre de defectos. Sin embargo cabe destacar que para calcular el porcentaje de madera libre de defectos, para la clasificación 3 el porcentaje se calculó en base a 2100 cm² y para el resto de las clasificaciones se utilizó 2400 cm² como base. Esto se debe a que en el re aserrado se pierden 5 mm en el ancho, por lo tanto la cantidad de madera libre de defectos es menor.

4.1.2 Propiedades físicas y mecánicas

En el cuadro N° 14 se observa la media y la distribución de las variables bajo estudio para las dos plantaciones analizadas en forma conjunta. Como se mencionó en el capítulo de materiales y métodos los ensayos con pequeñas probetas se realizaron solamente para la plantación de Durazno.

Cuadro N° 14: Media y distribución de las variables bajo estudio para las dos plantaciones juntas.

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo
Densidad corriente (g/ cm ³)	429	0.528	0.407	0.750
MOE no destructivo (MPa)	429	13919	8874	21510
MOE destructivo (MPa)	427	11658	7522	21267
MOR(MPa)	428	47.62	6.23	97.7
Densidad básica(g/ cm ³)	426	0.466	0.355	0.687
MOE pp (MPa)	221	13536	7529	51733
MOR pp (MPa)	222	84.81	15.67	134.93
Elevación dinámica (%)	222	256.48	40.28	802.20

En los cuadros N° 15 y 16 se presenta la descripción por separado de los principales parámetros descriptivos para ambas plantaciones.

Cuadro N° 15: Media y distribución de las variables bajo estudio para la plantación de Durazno.

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo
Densidad corriente(g/ cm ³)	221	0.557	0.438	0.750
MOE no destructivo(MPa)	221	14356	9922	21510
MOE destructivo(MPa)	221	11626	7675	16413
MOR(MPa)	221	45.74	13.12	97.7
Densidad básica(g/ cm ³)	218	0.489	0.384	0.687
MOE pp(MPa)	220	13547	7529	51733
MOR pp(MPa)	221	84.89	15.67	134.93

Cuadro N° 16: Media y distribución de las variables bajo estudio para la plantación de Rivera.

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo
Densidad corriente (g/ cm ³)	207	0.50	0.407	0.689
MOE no destructivo(MPa)	207	13443	8874	18439
MOE destructivo(MPa)	205	11698	7522	21267
MOR(MPa)	206	49.71	6.23	79.63
Densidad básica (g/ cm ³)	207	0.44	0.355	0.642

En el cuadro N° 16 se presentan los coeficientes de correlación y el límite inferior y superior del intervalo de confianza para el 95% entre las diferentes variables para la plantación de Durazno.

Cuadro N° 17: Coeficientes de correlación e intervalo de confianza del coeficiente para las variables bajo estudio para la plantación de Durazno.

Variable 1	Variable 2	Correlación		
		n	Lim inf 95%	Lim sup 95%
Densidad corriente (g/cm ³)	MOE no destructivo(MPa)	0.83	0.79	0.87
Densidad corriente (g/cm ³)	MOE destructivo(MPa)	0.61	0.52	0.69
Densidad corriente (g/cm ³)	Densidad básica (g/cm ³)	0.78	0.72	0.83
Densidad corriente (g/cm ³)	MOR pp(MPa)	0.61	0.52	0.68
MOE no destructivo (MPa)	MOE destructivo (MPa)	0.75	0.68	0.80
MOE no destructivo (MPa)	MOR (MPa)	0.56	0.46	0.65
MOE no destructivo (MPa)	Densidad básica (g/cm ³)	0.72	0.64	0.77
MOE no destructivo (MPa)	MOR pp (MPa)	0.64	0.55	0.71
MOE destructivo (MPa)	Densidad básica (g/cm ³)	0.70	0.63	0.77
MOE destructivo (MPa)	MOR pp (MPa)	0.61	0.52	0.69
Densidad básica (g/cm ³)	MOR pp (MPa)	0.71	0.64	0.77

En el cuadro N° 17 se observa que la densidad corriente presenta una correlación alta y positiva con el módulo elástico medido con el *FFT analyzer* y también con el medido en la maquina universal. En las figuras N° 14 y 15 se muestran los gráficos entre MOE (medido por los dos métodos) y la densidad

corriente. Este comportamiento es muy importante remarcarlo ya que teniendo buenas correlaciones entre ambas propiedades, se puede deducir los valores aproximados de una propiedad conociendo la otra, lo cual puede ser una herramienta muy importante para el mejoramiento genético. Por ejemplo se pueden seleccionar árboles en pie por sus valores de MOE, calculando la densidad del árbol con métodos como ser Pylodin que no requiere el corte del árbol. Esto marca la importancia que tienen las buenas correlaciones entre determinadas propiedades.

Otras de las variables que presentan alto coeficiente de correlación son el módulo de elasticidad medido con la maquina universal y el medido con *FFT analyzer*, en la figura N° 16 se muestra el gráfico que relaciona ambas variables. Esto marca la importancia de no tener que destruir las muestras para analizar propiedades mecánicas de importancia como ser el Módulo elástico. Sin embargo los intervalos de confianza para las medias no se superponen por lo tanto son estadísticamente diferentes con un 95% de confianza, como se observa en el cuadro N° 18.

Pérez del Castillo (2001) encontró también una correlación alta y positiva (0.825) entre el MOR de pequeñas probetas libres de defectos y la densidad básica. En el mismo trabajo el autor describe una correlación de 0.624 entre el MOE de pequeñas probetas libres de defecto y la densidad básica.

Sin embargo en este trabajo no se encontró una correlación alta entre estas dos variables, pero si se encontraron correlaciones altas y positivas entre la densidad básica y el MOE medido en piezas de tamaño de obra por métodos destructivos y no destructivos. Pérez del Castillo (2001) describe también una correlación alta y positiva (0.732) entre el MOE medido en piezas de tamaño real por método destructivo y el MOE en pequeñas probetas libres de defectos.

Cuadro N° 18 Limite superior e inferior del intervalo de confianza para las medias de MOE destructivo y no destructivo para el 95%.

Variable	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
MOE no destructivo (MPa)	14055	14656
MOE destructivo (Mpa)	11391	11860

La baja correlación entre las propiedades MOE o densidad y MOR en la maquina Universal, son explicadas por la influencia que provocan los defectos en la madera, como ser los nudos, pudriciones, corazón quebradizo, etc. Esta baja correlación se revierte cuando se trabaja con las pequeñas probetas libre de defectos, donde no hay influencia de los mismos, y se observan los valores de correlación altos. También como era de esperarse, hay una alta correlación entre la densidad corriente y la densidad básica.

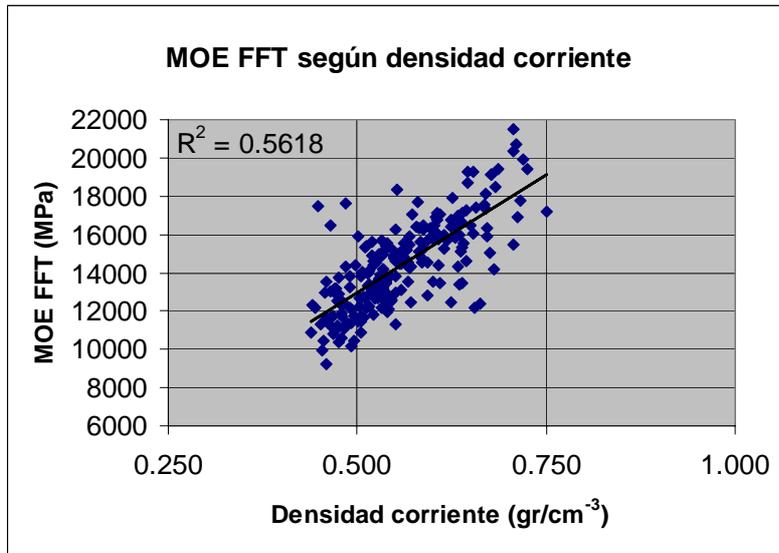


Figura N° 14: MOE FFT en función de densidad corriente Durazno

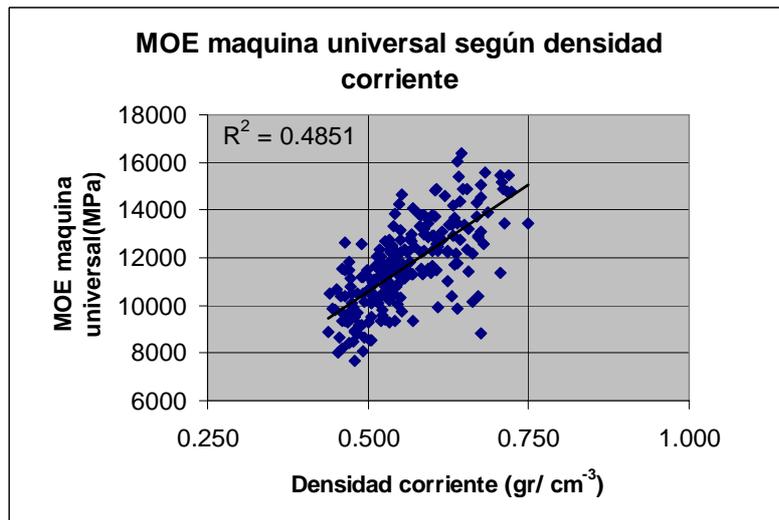


Figura N° 15: MOE maquina universal en función de densidad corriente Durazno

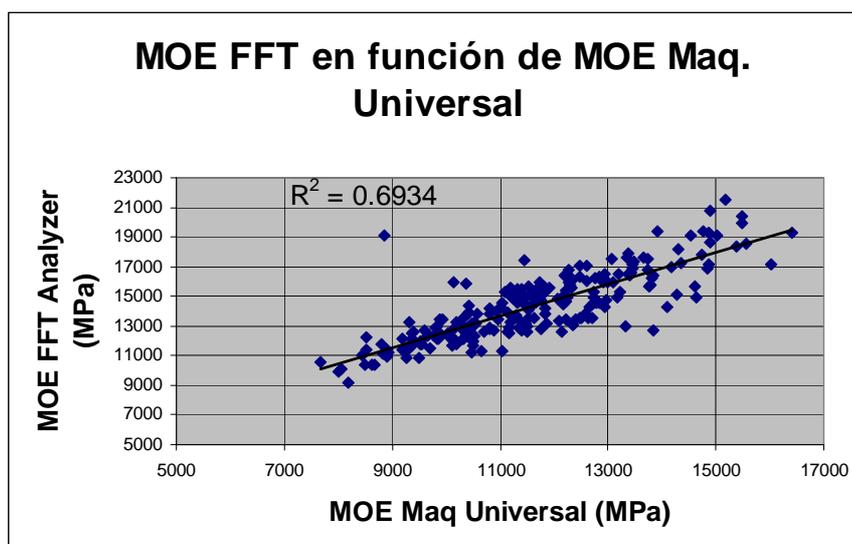


Figura N° 16: **MOE FFT analyzer en función de MOE maquina universal. Durazno**

En el cuadro N° 19 se presentan los coeficientes de correlación para la plantación de Rivera y sus respectivos límites para intervalos de confianza para el 95%.

Cuadro N° 19: Coeficientes de correlación e intervalo de confianza del coeficiente para las variables bajo estudio para la plantación de Rivera.

Variable 1	Variable 2	Correlación	Límite inferior	Límite superior
Densidad corriente (g/cm ³)	MOE no destructivo (MPa)	0.61	0.52	0.69
Densidad corriente (g/cm ³)	Densidad básica (g/cm ³)	0.88	0.85	0.91
MOE no destructivo (MPa)	MOE destructivo (MPa)	0.69	0.61	0.75
MOE no destructivo (MPa)	Densidad básica (g/cm ³)	0.63	0.54	0.70

De las correlaciones del cuadro N° 19 es importante destacar el coeficiente de correlación entre el MOE medido en forma destructiva y no destructiva. Este coeficiente no presenta un valor tan alto como para la plantación de Durazno. También se observa, en el cuadro N° 20, para esta plantación que los intervalos para las medias no se superponen, por lo tanto son poblaciones estadísticamente diferentes. En la figura N° 17 se muestra el grafico del MOE medido con maquina universal y el MOE medido con FFT. A pesar de que la correlación no sea tan alta como en el caso de Durazno, se puede afirmar de todas maneras que la correlación es buena, confirmando de esta manera la posibilidad de estimar el módulo elástico de la madera sin la necesidad de destruir la misma.

A diferencia de lo que ocurre en la plantación de Durazno, donde el MOE medido por ambos métodos presenta una correlación alta y positiva con la densidad básica, solo el MOE medido por el método no destructivo presenta una correlación alta y positiva con la densidad básica.

Cuadro N° 20 Limite superior e inferior del intervalo de confianza para las medias de MOE destructivo y no destructivo para el 95%.

Variable	Límite inferior	Límite superior
MOE FFT(MPa)	13176	13708
MOE maq univ (MPa)	11413	11981

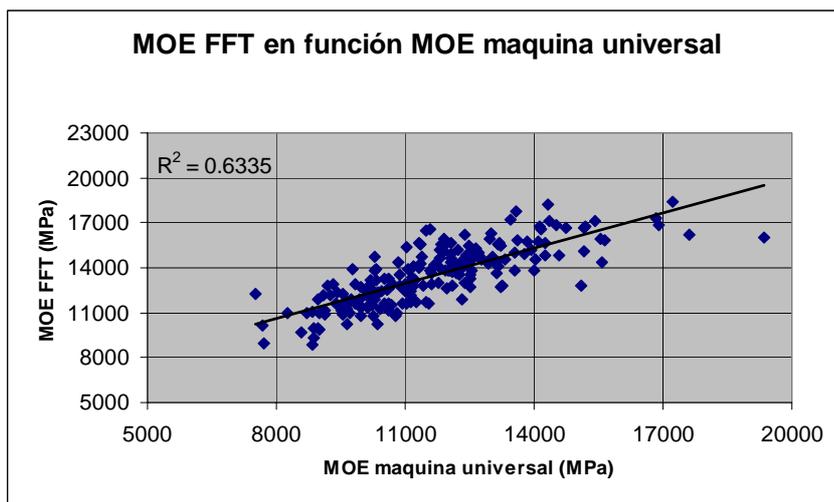


Figura N° 17: **MOE FFT analyzer en función de MOE maquina universal. Rivera**

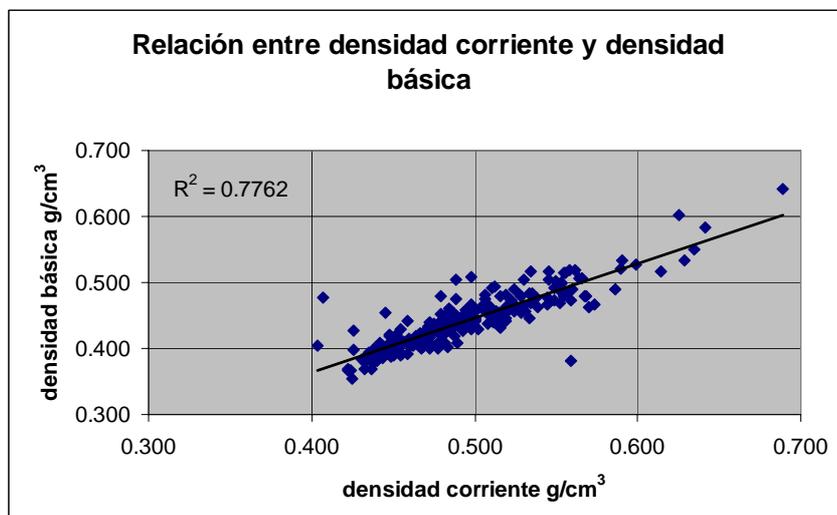


Figura N° 18. **Densidad corriente y densidad básica. Rivera**

Estos resultados difieren de los encontrados por Pérez Del Castillo (2001) donde encontró que el MOE medido por ambos métodos era estadísticamente igual.

En el mismo trabajo este autor encontró una correlación alta y positiva (0.732) entre el MOE medido en piezas tamaño de obra y el MOE de las probetas libres de defectos, mientras que en este trabajo la correlación es de 0.42. Estas diferencias pueden estar explicadas por la presencia de defectos en la madera los cuales están afectando las correlaciones.

4.2 ANÁLISIS DE VARIABLES

4.2.1 Densidad corriente Durazno

A continuación se muestra la prueba de efectos fijos tipo 3, donde se observa que con un 95% de confianza para esta variable la posición tiene un efecto significativo. Lo mismo ocurre con el efecto troza, y a su vez no hay efecto de interacción de ambas variables (cuadro N° 21).

Cuadro N° 21. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	5.35	0.0055
Posición	74.67	<.0001
Troza * posición	0.82	0.5121

Con este resultado se aplica la prueba de Tukey para comparación de medias con un 95% de confianza.

Cuadro N° 22. Tukey para densidad de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	0.6016	0.01109	A
B	0.0110	0.01110	B
BA	0.01112	0.01112	C

Del cuadro N °22 se desprende que las posiciones más externas presentan mayor densidad que las internas, es decir la posición C presenta mayor densidad que la B; y ésta a su vez tiene mayor densidad que la BA. Estos resultados están explicados por la mayor proporción de madera adulta presente en las piezas más externas. Pérez del Castillo (2001) encontró los mismos resultados. En la figura N° 19 se presenta un gráfico donde se observa la densidad en función de las trozas para las diferentes posiciones.

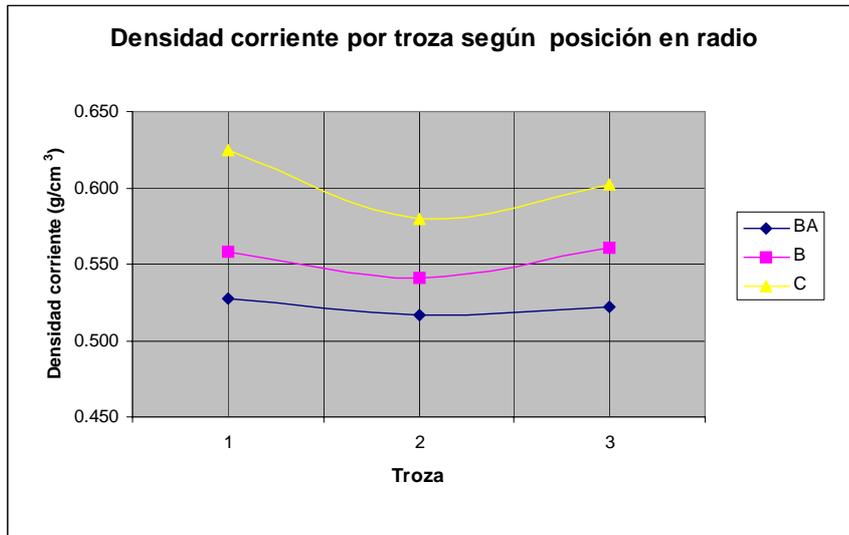


Figura N° 19. **Densidad corriente según troza por posición en radio. Durazno**

En la figura N° 19 se observa que para cualquiera de las trozas analizadas la posición C siempre presenta un mayor valor de densidad corriente. Como se había mencionado con la mayor presencia de madera juvenil, propiedades físicas como ser la densidad disminuyen.

En el cuadro N° 23 se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto troza con el 95% de confianza.

Cuadro N° 23. Tukey para densidad de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	0.5662	0.01078	A
2	0.5626	0.01208	AB
1	0.5488	0.01069	B

Se observa que la troza 3 es estadísticamente diferente de la 2, pero no de la 1, y a su vez la troza 2 tampoco es estadísticamente diferente de la 1, con un 95 % de confianza. Respecto a este comportamiento podemos observar algunos de los patrones posibles mencionados en la revisión, donde se presenta primero una disminución en los valores de la densidad y un posterior aumento.

En la figura N° 20 se observa el gráfico entre densidad corriente y la posición en el radio. La diferenciación en cuanto a la densidad corriente es más clara para la posición más externa, no presentando diferencias para las posiciones internas.

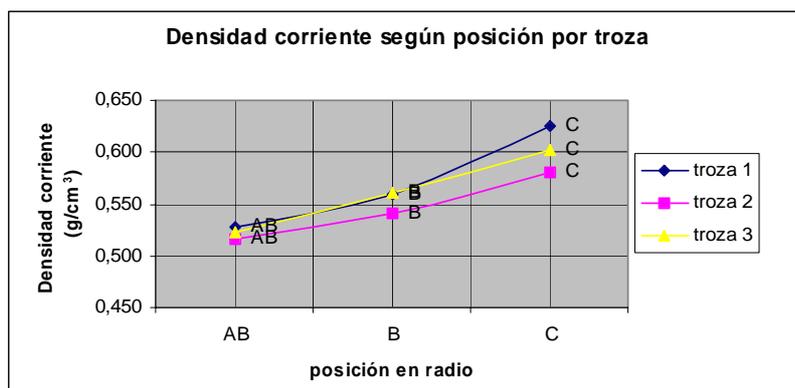


Figura N° 20. Densidad corriente por troza según posición en radio Durazno.

4.2.2 Densidad corriente Rivera.

Al igual que en el caso anterior, se realiza una prueba de efectos fijos tipo 3 para la densidad corriente con un 95% de confianza, dejando como efectos fijos la posición y la troza. Se observa que hay efecto troza, efecto posición y no hay efecto de interacción; para la confianza utilizada.

Cuadro N° 24. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	17.14	<.0001
Posición	22.75	<.0001
Troza * posición	3.02	0.0195

Cuadro N° 25. Tukey para densidad corriente efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	0.5078	0.008222	A
B	0.4926	0.008294	B
BA	0.4822	0.008231	C

En el cuadro N° 25 se puede observar que la posición más externa es estadísticamente diferente de la posición intermedia y de la más interna, y a su vez estas dos últimas son estadísticamente diferentes entre si; con una confianza del 95%. Teniendo la posición externa mayor densidad que la intermedia y esta última mayor densidad que la más interna. En la figura N° 19 se puede observar claramente este comportamiento.

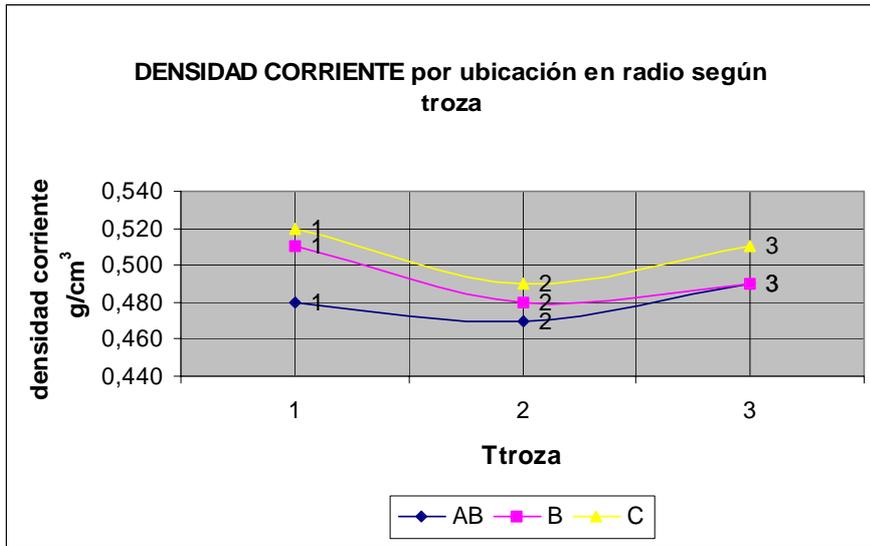


Figura N° 21. **Densidad corriente por posición en radio según troza (Rivera).**

En la figura N° 21 se observa que la posición C presenta para todas las trozas una densidad mayor. También se puede observar que la densidad presenta un descenso inicial con la altura para luego aumentar. En el cuadro N° 26 se presentan los resultados de la prueba de comparación de medias para el efecto troza.

Cuadro N° 26. Tukey para densidad corriente efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error	Grupo Tukey
-------	-------	-------	-------------

		estándar	(5%)
1	0.5028	0.008247	A
3	0.4982	0.008287	A
2	0.4815	0.008211	B

Se observa que la troza 1 y 3, no son estadísticamente diferentes, y ambas si lo son respecto a la troza 2. Donde las trozas 1 y 3 son de mayor densidad que la troza 2. En la figura N° 22 se grafica la densidad en función de la ubicación según la posición en el radio. Como se observa, esta plantación presenta el mismo comportamiento que la de Durazno donde encontramos el menor valor de densidad en la troza N° 2. También se puede ver una tendencia en donde el valor de densidad la posición AB para la troza 1 es menor que para la 3 y que las posiciones B y C presentan mayores valores para la troza 1 que para la 3. Esto puede estar explicado por la mayor proporción de madera juvenil que presenta la troza 1 en la posición AB.

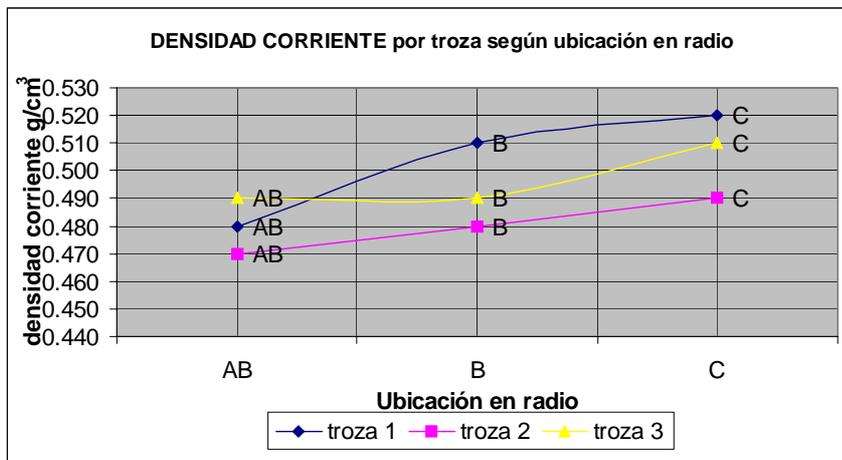


Figura N° 22. **Densidad corriente por troza según posición (Rivera)**

4.2.3 Densidad básica Durazno

Al igual que en el caso anterior, se realiza una prueba de efectos fijos tipo 3 para la densidad básica con un 95% de confianza, dejando como efectos fijos la posición y la troza. Se observa que hay efecto posición y no hay efecto troza y de interacción; para la confianza utilizada.

Cuadro N° 27. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	0.15	0.8615
Posición	21.38	<.0001
Troza * posición	2.02	0.0931

En el cuadro N° 28 se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto posición. Al igual que para la densidad corriente las posiciones más externas presentan mayores valores de densidad con un 95% de confianza.

Cuadro N° 28. Tukey para densidad básica efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	0.5182	0.01015	A
B	0.4872	0.01024	B
BA	0.4594	0.01020	C

4.2.4 Densidad básica Rivera

A continuación se muestra la prueba de efectos fijos tipo 3, donde se observa que con un 95% de confianza para esta variable la posición tiene un efecto significativo. Lo mismo ocurre con el efecto troza, y a su vez hay efecto de interacción de ambas variables.

Cuadro N° 29. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	11.90	<.0001
Posición	17.89	<.0001
Troza * posición	2.75	0.0300

En el cuadro N° 29 se observa que tanto el efecto posición como el efecto troza son significativos a diferencia de lo que sucede en la plantación de Durazno

donde solo el efecto posición fue significativo. En los cuadros N° 30 y 31 se presentan las pruebas de comparación de medias para los dos efectos.

Cuadro N° 30 Tukey para densidad básica efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	0.4547	0.007195	A
B	0.4437	0.007311	A
BA	0.4278	0.007210	B

En el cuadro N° 30 se observa que las posiciones C y B presentan diferencias significativas con la BA. La diferencia que se presenta con respecto al efecto posición entre las plantaciones puede estar explicado por la posibilidad en la plantación de Durazno de extraer posiciones más externas o con mayor proporción de madera adulta debido a la edad de la plantación.

La variación de la densidad tanto corriente como básica en el radio en ambas plantaciones coincide con el patrón citado por la mayoría de los autores en la bibliografía, la densidad aumenta desde el centro hacia la corteza. Esta variación esta explicada por la mayor proporción de madera adulta que se encuentra en las zonas más externas.

Cuadro N° 31. Tukey para densidad básica efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	0.4494	0.007289	A
1	0.4475	0.007236	A
2	0.4293	0.007178	B

En cuadro N° 31 se observa que las trozas 3 y 1 presentan una diferencia significativa con la troza 2. Este comportamiento es el mismo al encontrado para la densidad corriente. A continuación se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto posición en el radio.

La variación longitudinal de la densidad corriente y básica no presenta un comportamiento tan claro como la radial. Para la plantación de Durazno la densidad corriente de la troza 3 presenta una densidad superior a la 2, pero no es diferente de la 1. En la plantación de Rivera la densidad corriente de las trozas 3 y 1 presentan una densidad superior que la 2. Estos resultados coinciden con los citados en la bibliografía, donde los autores describen generalmente que la densidad aumenta con la altura, pero en algunas situaciones se produce un descenso inicial de la misma.

4.2.5 Módulo elástico no destructivo (FFT) Durazno

Al igual que con la densidad corriente y básica, se procederá a analizar la variable dependiente MOE no destructivo, comenzando con la prueba de efectos

fijos, con un 95 % de confianza donde se observará si hay efecto de troza y/o posición.

Cuadro N° 32. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	18.20	<.0001
Posición	67.91	<.0001
Troza * posición	0.07	0.9911

En el cuadro N° 32, se observa que tenemos efecto troza y posición para MOE no destructivo. A su vez que no hay efecto interacción de troza y posición. Utilizando un 95% de confianza.

A continuación se presenta el resultado de la prueba de comparación de medias para el efecto posición.

Cuadro N° 33. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	15648	331.74	A
B	14161	332.22	B
BA	12808	332.77	C

En el cuadro N° 33 se observa que la posición más externa es estadísticamente diferente a la posición intermedia y que ésta es también estadísticamente diferente a la de la posición más interna. Observando mayores valores de MOE en la posición C, y en segundo lugar las tablas de la posición B. Con un 95 % de confianza. Como para el caso de la densidad estos resultados se explican por una mayor proporción de madera adulta en las posiciones más externas.

Cuadro N° 34. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	14988	316.73	A
2	14326	312.66	B
1	13303	376.98	C

Se observa que la troza 3 es estadísticamente diferente de la troza 2 y de la 1. A su vez que estas dos últimas son estadísticamente diferentes entre si. Teniendo la troza 3 mayor valor de MOE que la troza 2; y ésta mayor MOE que la troza 1. Con una confianza de 95 %. Como explica Glos (1995) el MOE se ve afectado por la presencia de defectos, sobre todo nudos que producen una desviación de las fibras. Por ésta razón se puede explicar las diferencias que se presentan entre las trozas, ya que la troza 1 presenta nudos de mayor tamaño.

4.2.6 Módulo elástico no destructivo (FFT) Rivera

A continuación se muestra la prueba de efectos fijos tipo 3, donde se observa que con un 95% de confianza para esta variable la posición tiene un efecto significativo. Lo mismo ocurre con el efecto troza, y a su vez se observa que no hay efecto de interacción de ambas variables.

Cuadro N° 35. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	13.89	<.0001
Posición	101.23	<.0001
Troza * posición	1.25	0.1037

Dados los resultados del cuadro N° 35 se procede a realizar la prueba de comparación de medias para el efecto troza.

En el cuadro N° 36 se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto posición con un 95% de confianza.

Cuadro N° 36. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	14769	234.85	A
B	13599	241.80	B
BA	11905	235.76	C

También en el efecto posición presenta el mismo comportamiento respecto a Durazno con la variable MOE no destructivo. Utilizando 95 % de confianza, al igual que la localidad anterior.

Cuadro N° 37. Tukey para MOE no destructivo de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	13963	240.52	A
2	13454	233.82	B
1	12855	237.35	C

La muestra de Rivera presenta el mismo comportamiento que para Durazno, respecto al efecto troza para MOE no destructivo. Utilizando la misma confianza que en el caso mencionado. Por lo tanto para el módulo elástico se observa un aumento progresivo en los valores al aumentar en la altura.

4.2.7 Módulo elástico destructivo (MU) Durazno

4.2.7.1 Módulo elástico destructivo piezas tamaño de obra

En el cuadro N° 38 se presenta la prueba de efectos fijos tipo 3 donde se observa que para el 95% de confianza los efectos troza y posición son significativos.

Cuadro N° 38. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	7.62	<.0001
Posición	27.14	<.0001
Troza * posición	1.81	0.1282

Considerando los resultados del cuadro N° 38 a continuación se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto posición con un 95% de confianza.

Cuadro N° 39. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	12197	239.30	A
B	11737	240.68	A
BA	10468	240.97	B

En el cuadro N° 39 se muestra que para el efecto posición, las tablas más externas y las tablas intermedias son diferentes de las tablas más internas. Teniendo las tablas C y B mayores valores en el módulo elástico que las tablas BA. Utilizando un 95% de confianza. En la figura N° 23 se presenta el gráfico del MOE por troza según ubicación en el radio.

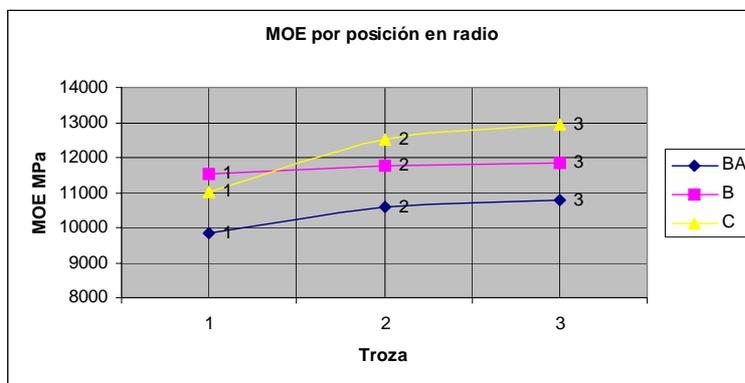


Figura N° 23. MOE (MU) por posición en radio según troza

En el cuadro N° 40 se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto troza con un 95% de confianza.

Cuadro N° 40. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	11902	218.58	A
2	11691	213.84	A
1	10811	295.11	B

En el cuadro N° 40 se observa que las trozas 3 y 2 no son significativamente diferentes, pero ambas si son diferentes que la troza 1. Teniendo la troza 1 menores valores de MOE que las demás trozas 2 y 3. Este resultado coincide con el obtenido en el ensayo no destructivo en el sentido de que la troza 1 es la que presenta menores valores, sin embargo se diferencia en que no hay diferencias significativas entre las trozas 2 y 3. En la figura N° 24 se presenta el gráfico entre MOE y posición en el radio según troza. De todas maneras se mantiene la tendencia de aumento de los valores al aumentar la altura.

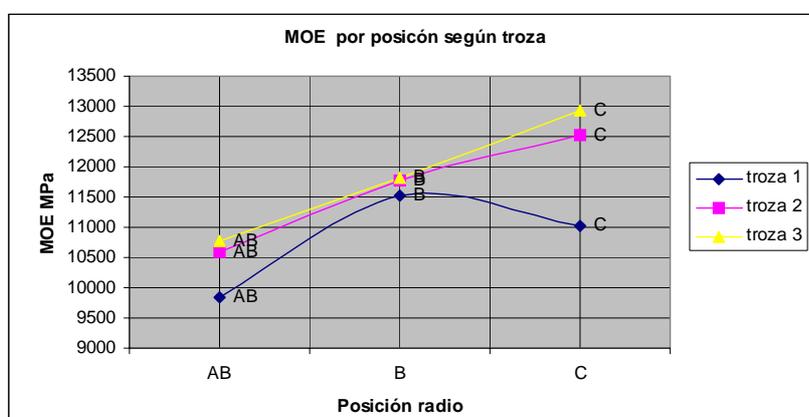


Figura N° 24. MOE (MU) según posición en radio por troza Durazno

4.2.7.2 Módulo elástico destructivo pequeñas probetas

A continuación se presenta el cuadro N° 41, donde se muestra la prueba de efectos fijos tipo 3. Se observa que el único efecto significativo es la posición.

Cuadro N° 41. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	0.40	0.6713
Posición	6.19	0.0025
Troza * posición	0.61	0.6564

Los resultados del cuadro N° 41 muestran con un 95% de confianza que solamente es significativo el efecto posición. En los cuadros N° 42 y 43 se presentan las pruebas de comparación de medias para ambos efectos con un 95% de confianza.

Cuadro N° 42. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	14638	538.22	A
B	13456	533.73	AB
BA	12265	534.20	B

En el cuadro N° 42 se observa que las probetas C presentan un mayor MOE que las BA, estos resultados muestran la misma tendencia que los presentados para las piezas de tamaño de obra pero con diferencias menores entre las medias. Por lo tanto se confirma la importancia de la presencia de madera juvenil sobre los valores en las propiedades mecánicas.

Cuadro N° 43. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
2	13768	443.39	A
3	13481	456.27	A
1	13111	697.53	A

En esta prueba de comparación se observa que no existen diferencias estadísticas entre las trozas. Esto puede ser explicado por la no presencia de defectos en las probetas donde se realiza el ensayo, lo cual puede estar influenciando en los valores.

4.2.8 Módulo elástico destructivo (MU) Rivera

En el cuadro N° 44 se presenta la prueba de efectos fijos tipo 3 para el 95% de confianza.

Cuadro N° 44. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	5.02	0.0076
Posición	39.23	<.0001
Troza * posición	0.36	0.8349

En esta prueba, vemos que hay efectos significativos en troza y posición para la variable módulo elástico medido por el método destructivo, pero no hay efectos de interacción para una confianza de 95 %.

Cuadro N° 45. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
----------	-------	----------------	------------------

C	12721	282.98	A
B	11775	294.53	B
BA	10467	284.18	C

Se observa el mismo comportamiento que en la población de Durazno, teniendo mayores valores en tablas C, y a su vez las tablas B mayores valores que las tablas BA. Cada posición es significativamente diferente de las otras, con un 95 % de confianza. En la figura N° 25 se presenta el gráfico de MOE en función de la troza según posición.

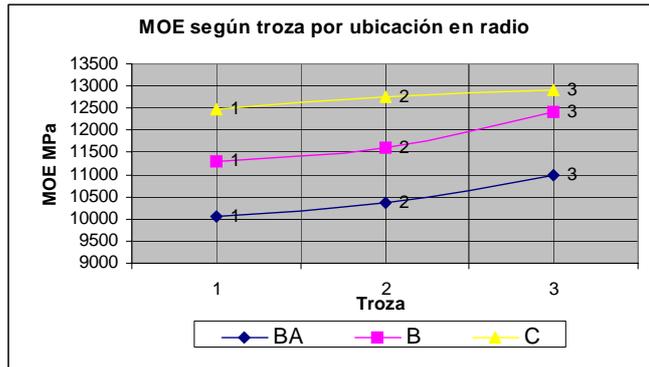


Figura N° 25. MOE destructivo por posición en radio según troza. Rivera

En el gráfico se observa que la posición C es superior para todas las trozas y la BA es la peor. A continuación se presenta la prueba de comparación de medias para el efecto troza con un 95% de confianza.

Cuadro N° 46. Tukey para MOE destructivo de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
3	12111	290.47	A
2	11577	283.95	AB
1	11276	286.28	B

Para el efecto troza, vemos que la troza 3 es significativamente diferente que la troza 1, pero ambas no son significativamente diferentes de la troza 2, utilizando un 95 % de confianza. Estos resultados coinciden con los encontrados para la plantación de Durazno

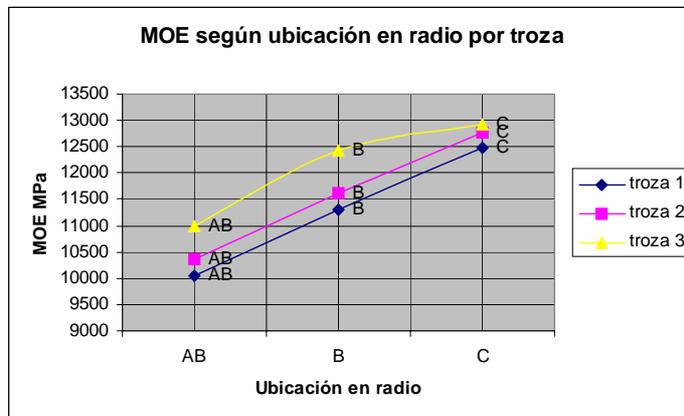


Figura N° 26. MOE destructivo por troza según posición en radio. Rivera

4.2.9 Módulo de rotura (MU) Durazno

4.2.9.1 Módulo de rotura piezas tamaño de obra

Cuadro N° 47. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	2.98	0.0534
Posición	15.12	<.0001
Troza * posición	3.16	0.0153

Con 95 % de confianza, tenemos efectos significativos de posición pero no hay efecto de troza ni de interacción.

Cuadro N° 48. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	52.0953	2.0650	A
B	46.2289	2.0988	A
BA	37.1809	2.1015	B

Los valores de MOR son significativamente mayores para las tablas C y B, a su vez éstas tablas son significativamente diferentes que las tablas BA; presentando las primeras mayores valores de MOR que las tablas con mayor proporción de madera juvenil, utilizando un 95 % de confianza. En la figura N° 27 se observa claramente este comportamiento, donde en la primer troza los valores son muy similares, provocado por la mayor cantidad de defectos de esta troza.

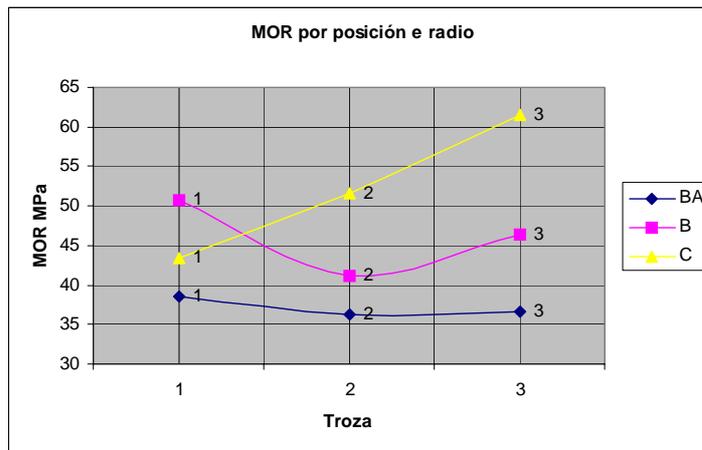


Figura N° 27. MOR según troza por posición en radio Durazno

4.2.9.2 Módulo de rotura pequeñas probetas.

En el cuadro N° 49, se observa que para la prueba de efectos fijos, la troza no tiene efectos significativos y si la posición en el radio, con un 95 % de confianza.

Cuadro N° 49. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	0.45	0.6384
Posición	27.89	<.0001
Troza * posición	1.19	0.3179

En el cuadro N° 49 si se observa el valor de α , se ve que este es superior que en el caso de las probetas de tamaño real. Por lo tanto, el efecto posición es inferior que con las tablas de tamaño real. Esto se da, por la influencia de los defectos sobre los valores en las propiedades como se ha observado en muchos de los ensayos.

Cuadro N° 50. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%.

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	94.5177	2.8073	A
B	84.7703	2.8322	B
BA	70.9389	2.8346	C

Del cuadro N° 50 se deduce que las tablas de posición más externa son las que tienen mayores valores en el módulo de rotura. Donde las tablas más externas son significativamente diferentes y presentan valores mayores que las tablas intermedias, y a su vez estas últimas son diferentes y presentan valores superiores

que las tablas más internas, de mayor contenido de madera juvenil. Utilizando un 95% de confianza.

4.2.10 Módulo de rotura (MU) Rivera

Cuadro N° 51. Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	11.25	<.0001
Posición	27.26	<.0001
Troza * posición	1.29	0.2764

En el cuadro N° 51 se observa que hay efectos significativos de troza y de posición. Pero no hay efecto de interacción; utilizando un 95% de confianza.

Cuadro N° 52. Tukey para MOR de tabla efecto posición para el 95%

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	57.3141	1.7539	A
B	49.5793	1.8695	B
BA	41.4743	1.7680	C

En el cuadro N° 52 se observa el mismo comportamiento que en Durazno, teniendo las tablas C mejores valores que las B y estas últimas mejores que las BA. Utilizando un 95 % de confianza. Al igual que en las demás propiedades, que la presencia de madera juvenil provoca una disminución en los valores.

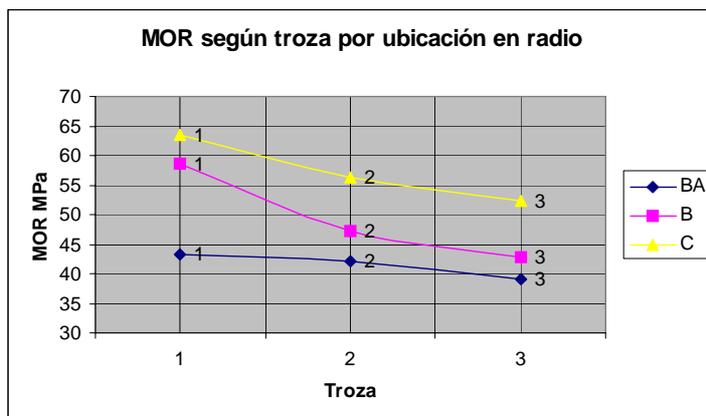


Figura N° 28. MOR por posición en radio según troza Rivera

En la grafica N° 28 se observa con más claridad los mejores valores en MOR para las trozas más externas, para todas las trozas.

Cuadro N° 53. Tukey para MOR de tabla efecto troza para el 95%

Troza	Media	Error	Grupo Tukey
-------	-------	-------	-------------

	estándar		(5%)
1	55.1379	1.7929	A
2	48.5417	1.7529	B
3	44.6880	1.8388	B

Con un 95% de confianza, la troza 1 presenta mayores valores que las troza 2 y 3, pero estas últimas no son significativamente diferentes. Teniendo la primer troza mayores valores que trozas siguientes. Este comportamiento no sigue ningún patrón definido. Por lo que puede estar explicado por defectos en la madera que alteran los valores en del módulo de rotura.

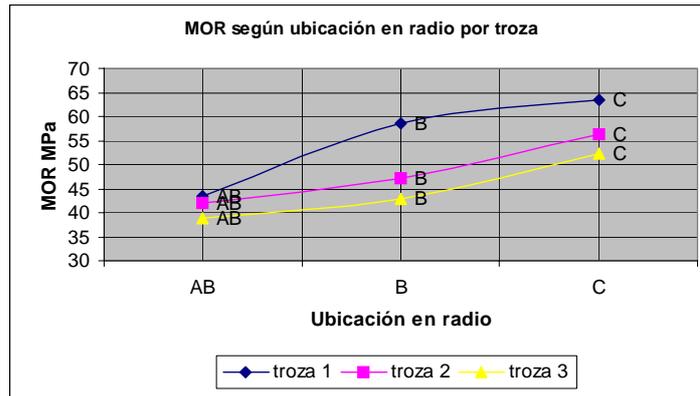


Figura N° 29. MOR por troza según posición en radio. Rivera

4.2.11 Flexión dinámica Durazno

Cuadro N° 54 . Prueba de efectos fijos tipo 3 (troza y posición).

Efecto	Valor de F	Probabilidad > F
Troza	0.88	0.4168
Posición	16.36	<.0001
Troza * posición	0.25	0.9113

En el cuadro N° 54 se observa que para el 95% de confianza el único efecto significativo es la posición. En el cuadro N° 55 se presenta la prueba de comparación de medias para el 95%.

Cuadro N° 55. Tukey para flexión dinámica de pequeñas probetas efecto posición para el 95%.

Posición	Media	Error estándar	Grupo Tukey (5%)
C	438.96	24.3471	A
B	369.55	24.8249	A
BA	248.82	24.8028	B

En el cuadro N° 55 se observa que las posiciones más externas presentan valores mayores que la posición BA. Este comportamiento está explicado por la mayor proporción de madera adulta en las posiciones más externas. En la figura N° 30 se grafica los valores de flexión dinámica según posición.

4.3 EFECTOS POSICIÓN Y TROZA SOBRE VARIABLES

4.3.1 Efectos por variable

Se presenta a continuación una serie de representaciones gráficas donde se muestra el comportamiento de las propiedades respecto a la posición de las piezas tamaño obra en el radio y de la troza en forma independiente.

4.3.1.1 Efectos de posición en radio sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (RIVERA).

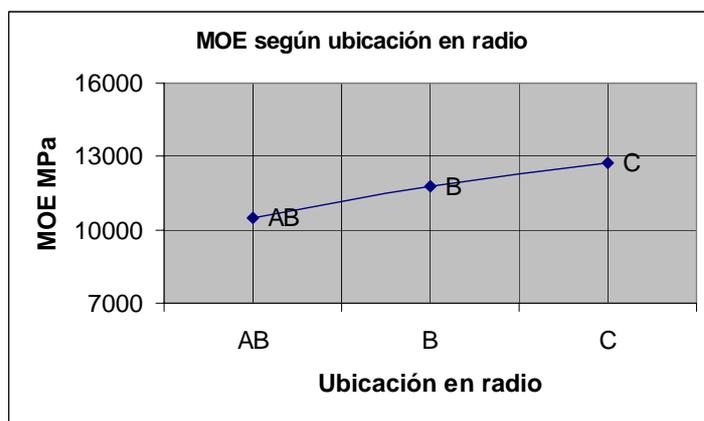


Figura N° 30. MOE (MU) según posición en radio Rivera

En la gráfica anterior se observa que a medida que las piezas presentan una posición más exterior respecto al centro de la troza, los valores de MOE tienden a aumentar.

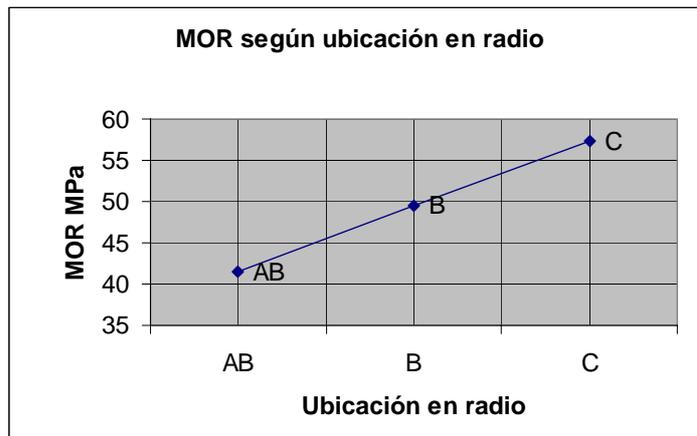


Figura N° 31. **MOR según posición en radio Rivera**

Aquí al igual que con el módulo elástico, a medida las piezas son más externas, los valores en el módulo de rotura aumentan.

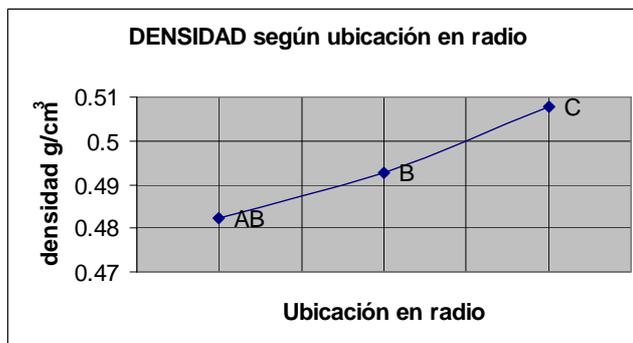


Figura N° 32. **Densidad corriente según posición en radio Rivera**

Para la densidad corriente se observa el mismo comportamiento que con las propiedades anteriores.

Para el caso de los efectos de la posición en radio los valores de las propiedades aumentan al aumentar la proporción de madera adulta. Como cita la revisión bibliográfica Coronel (1994) explica que la madera juvenil tiene menor densidad, y tiene mayores valores de ángulo micro fibrilar lo que provoca menores valores en las propiedades como elasticidad y rotura de la madera.

4.3.1.2 Efectos de troza sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (RIVERA)

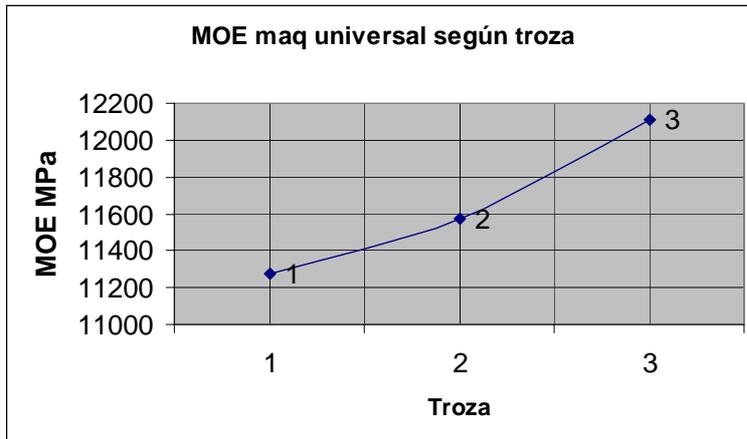


Figura N° 33. **MOE (MU) según troza Rivera**

Como se observa en el gráfico, hay un incremento en los valores del módulo elástico a medida que aumentamos la altura de la troza.

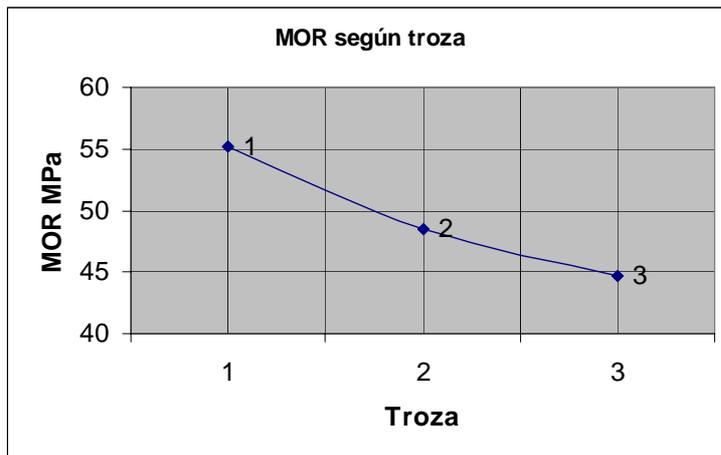


Figura N° 34. **MOR según troza Rivera**

En el caso del MOR se nota una tendencia que a medida que aumenta la altura de la probeta los valores de módulo de rotura disminuyen.

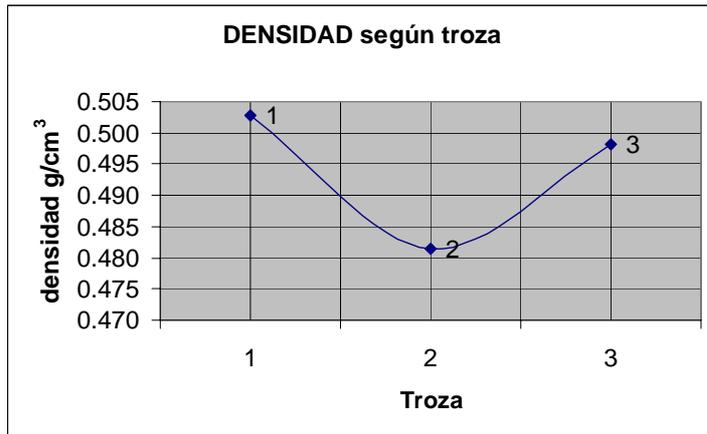


Figura N° 35. Densidad corriente según troza Rivera

Observando las anteriores gráficas se resume lo visto anteriormente acerca de los patrones de variación en la longitud del árbol, donde no se sigue un patrón definido. Donde se observa que en el caso del MOE los valores aumentan a medida que aumentamos en la altura, para el MOR pasa lo contrario y en la densidad vemos que primero disminuye y luego aumenta los valores con la altura de la troza. Esto se debe a la importancia que tiene los defectos de la madera sobre las propiedades.

4.3.1.3 Efectos de posición en radio sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (DURAZNO)

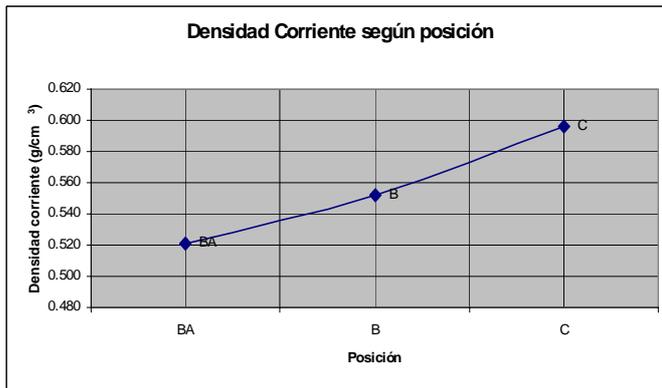


Figura N° 36. Densidad corriente según posición en radio Durazno

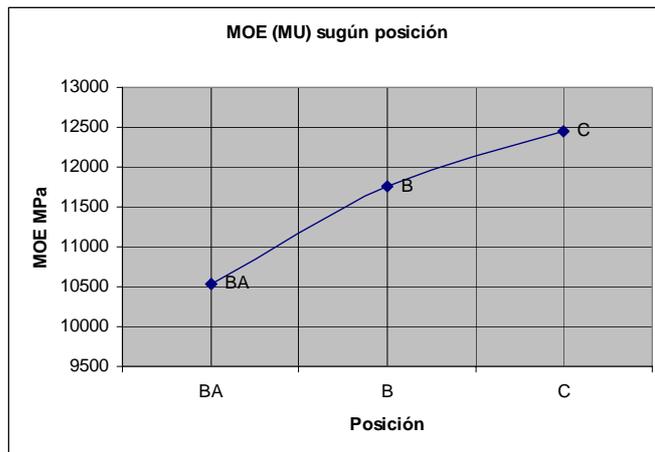


Figura N° 37. MOE (MU) según posición en radio Durazno

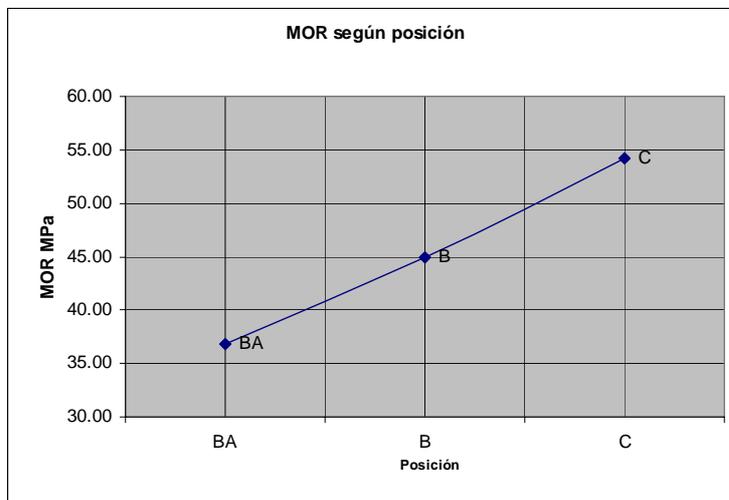


Figura N° 38. MOR según posición en radio Durazno

En las gráficas anteriores se observa el mismo comportamiento que en el caso de Rivera, donde a medida que las piezas son más externas los valores en las propiedades físicas aumentan.

Los resultados de MOE para las dos plantaciones coinciden con los descriptos por Pérez del Castillo (2001), donde las piezas más externas, es decir las que tienen mayor proporción de madera adulta, presentan un MOE mayor que las cercanas a la médula. Este comportamiento también se presenta para las pequeñas probetas libres de defectos.

Para la variación en altura del MOE las plantaciones presentan un aumento del mismo con la altura, este comportamiento se observa con mayor claridad cuando se utiliza el *FFT analyzer* para medirlo. Pero para el caso de pequeñas probetas libres de defectos los valores según la altura son estadísticamente iguales. Por lo tanto se puede concluir que las diferencias presentadas en altura para las piezas tamaño de obra se deben solamente a la presencia desigual de defectos en las diferentes trozas.

4.3.3.4 Efectos de troza sobre MOE (MU), MOR, densidad corriente (DURAZNO)

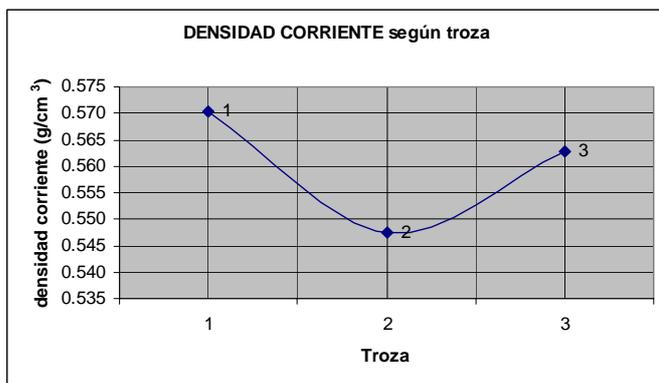


Figura N° 39. Densidad corriente según troza Durazno

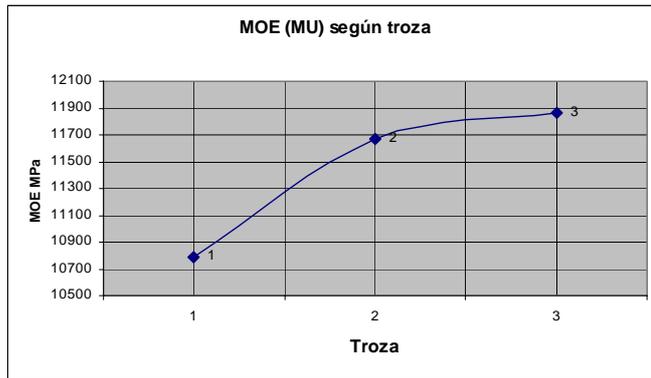


Figura N° 40. **MOE (MU) según troza Durazno**

En la figura N° 40 se observa la tendencia a aumentar los valores de módulo elástico a medida que aumentamos la altura de la troza. Obteniendo el mismo comportamiento que la población de Rivera.

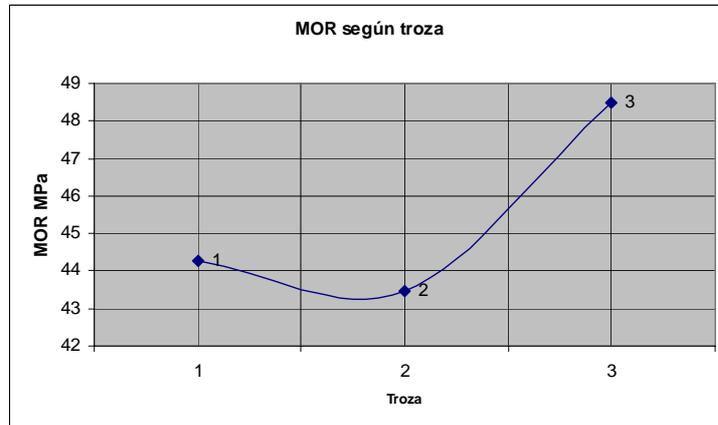


Figura N° 41. **MOR según troza Durazno**

Al igual que se comentó para la población de Rivera, vemos que no hay una tendencia definida para las propiedades con la posición de longitud, e incluso para el Módulo de rotura se observa un comportamiento diferente al de Rivera, donde los valores de MOR primero disminuyen y luego aumentan. Para el caso de densidad y MOE se observa lo mismo que en Rivera.

4.3.2 Efectos generales

A continuación se presenta un resumen de las principales variables y de cómo se ven afectadas por los diferentes efectos (troza y posición). En el siguiente

cuadro, se muestra el valor máximo de alfa para que el efecto sea significativo en todas las variables estudiadas y para ambas poblaciones (Rivera y Durazno).

Cuadro N° 56. Valores de alfa máximos para cada variable y población.

Variable	Población	Pr > F troza	Pr > F posición
Densidad corriente g/cm ³	DUR	0.0055	< 0.0001
MOE FFT MPa	DUR	< 0.0001	< 0.0001
MOE MU MPa	DUR	< 0.0001	< 0.0001
MOR MPa	DUR	0.0534	< 0.0001
Densidad básica g/cm ³	DUR	0.8615	< 0.0001
MOE pp MPa	DUR	0.6713	0.0002
MOR pp MPa	DUR	0.6384	< 0.0001
Densidad corriente g/cm ³	RIV	< 0.0001	< 0.0001
MOE FFT MPa	RIV	< 0.0001	< 0.0001
MOE MU MPa	RIV	0.0076	< 0.0001
MOR MPa	RIV	< 0.0001	< 0.0001
Densidad básica g/cm ³	RIV	< 0.0001	< 0.0001

Se observa una tendencia a que los valores de alfa máximos para que el efecto sea significativo son mayores en el efecto troza, por lo que podríamos deducir que la tendencia marca que el efecto posición de la tabla es más significativo que el efecto troza y la variabilidad está explicada por los defectos de la madera.

4.3.3 Comparación de las plantaciones

En este apartado se presenta la comparación entre las variables de las dos plantaciones. Estas comparaciones no permiten un análisis profundo debido a las diferencias de: origen genético, sitio, manejo y edad; por lo tanto las diferencias entre valores no pueden ser atribuidas a una sola causa. A continuación en el cuadro N° 57 se presentan los intervalos de confianza de cada variable para las dos plantaciones para el 95%.

Cuadro N° 57 Intervalos de confianza para el 95% de las dos plantaciones.

Variable (plantación)	Media	Desvío	LI	LS
Densidad corriente (MPa)				
Durazno	0.558	0.07	0.549	0.567
Rivera	0.496	0.048	0.489	0.503
MOE no destructivo (MPa)				
Durazno	14363	2283	14063	14663
Rivera	13443	1950	13177	13709
MOE destructivo (MPa)				
Durazno	11622	1780	11388	11856
Rivera	11698	2074	11414	11982

MOR (MPa)				
Durazno	45.68	17.41	43.390	47.970
Rivera	49.7	15.58	47.572	51.828
Densidad básica (g/cm ³)				
Durazno	0.488	0.068	0.479	0.497
Rivera	0.443	0.045	0.437	0.449

En el cuadro N° 57 se puede observar que para las variables: densidad corriente, básica y para MOE no destructivo la plantación de Durazno presenta valores mayores que la de Rivera. Sin embargo para las variables MOE destructivo y MOR no se presentan diferencias significativas al 95% entre las medias de ambas plantaciones.

4.4 EFECTO VELOCIDAD DE CRECIMIENTO

Con el propósito de evaluar el efecto de la velocidad de crecimiento sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera, se correlacionó las variables densidad, Módulo elástico destructivo y Módulo de rotura, con la clase diamétrica de los árboles de los cuales se obtuvieron las probetas ensayadas.

Estas clases diamétricas son el indicador de la velocidad de crecimiento, donde las clases diamétricas superiores marcan una velocidad de crecimiento mayor. Las clases diamétricas se realizan tomando en cuenta el diámetro del árbol a 1.30 m de altura (DAP).

Para el muestreo de Durazno, los árboles se dividieron en 3 clases diamétricas: clase 1 con los árboles menores de 48 cm de DAP, clase 2 con los árboles que tenían entre 48 y 56 cm de DAP, y por último la clase 3 con los árboles cuyo DAP superaba los 56 cm. En el caso del muestreo de Rivera También se dividieron en tres clases diamétricas pero con diferentes rangos: clase 1 los árboles de DAP menor a 39 cm, clase 2 los que tenían entre 39 cm y 45 cm de DAP y la clase 3 con los mayores a 45 cm.

Los valores de densidad, MOE y MOR se calcularon como el promedio de las trozas 1, 2 y 3 para cada árbol.

En el siguiente cuadro se presenta los resultados del análisis mencionado.

Cuadro N° 58. Correlaciones de propiedades mecánicas y velocidad de crecimiento.

Plantación	CORR 1	CORR 2	CORR 3
Rivera	-0.279	-0.121	0.024
Durazno	0.301	0.176	0.041

CORR 1: correlación entre densidad de tabla y clase diamétrica.

CORR 2: correlación entre MOE y clase diamétrica.

CORR 3: correlación entre MOR y clase diamétrica.

En el cuadro se observa que no hay correlación entre la clase diamétrica y las propiedades estudiadas. Esto tiene una gran significación, ya que podemos seleccionar por velocidad de crecimiento (carácter de importancia) y no se estará seleccionando en contra de las propiedades de la madera.

5.CONCLUSIONES

Para la obtención de madera libre de defectos es muy importante el manejo silvicultural de las plantaciones, sobre todo la poda. Las clasificaciones realizadas pueden aportar información para la caracterización de la madera para diversos fines. Sería importante que se realizaran estudios con plantaciones sometidas a una silvicultura intensa para comparar los resultados. En la actualidad hay nuevas tecnologías para obtener mejores aprovechamientos de la madera, y por eso en la clasificación visual realizada se agregó una nueva clase con plantillas de menor tamaño (tercera). Pero, además, ya hay mejores tecnologías, por esto se podría redefinir los límites para la categoría tercera. Con esto, se lograría otro de los objetivos fundamentales de la industria de la madera como ser mejorar y aumentar los usos de la madera.

Se observaron buenas correlaciones entre la medición del módulo elástico a través de métodos no destructivos y destructivos, lo cual es muy importante ya que permite estimar el valor de una propiedad mecánica importante a través de un método que no implica la destrucción de la muestra, que también significa un avance importante en el área de los costos que se requieren para un estudio de estas dimensiones.

Otra correlación muy interesante es la de la densidad con el módulo elástico, donde se observaron valores de correlación aceptables. Esto es de gran significación para el estudio de las propiedades porque además de dar las ventajas de disminuir el número de experimentos a realizar sobre la madera y lo que incide directamente en el costo que implica, también es sumamente importante ya que se podría medir densidad del árbol en pie a través de ciertas metodologías, y posibilitar hacer selección genética de estas propiedades. Sería importante en futuros estudios conocer la correlación que presentan estas dos variables en el caso de madera juvenil y también las correlaciones entre madera adulta y juvenil para las diferentes propiedades lo que posibilitaría realizar selección a más temprana edad.

Hay un importante efecto en las propiedades según la posición de donde son extraídas las piezas. Todos los valores de las propiedades aumentan a medida que nos alejamos del centro hacia la corteza. El efecto de la madera juvenil se presenta con claridad, al aumentar la madera adulta siempre obtenemos mayores valores en todas las propiedades.

No se encontraron patrones claros de variación en el sentido longitudinal, no se encontraron diferencias para las probetas libres de defectos extraídas de diferentes alturas. Para las piezas de tamaño de obra se encontraron algunas diferencias entre los valores de las propiedades para las diferentes alturas pero esto es debido a los defectos de las piezas. Hay efectos claros de los defectos de la madera, esto se observa en las propiedades al estudiarlas por separado, y también al observar las correlaciones en Durazno, donde se ve que los valores de MOR de las pequeñas

probetas libres de defectos se correlacionan muy bien con las demás propiedades, cuando en las probetas de tamaño real no sucede lo mismo.

Las plantaciones presentan diferencias en los valores de las variables bajo estudio. La plantación de Durazno presenta mayores valores de densidad y MOE medido con método no destructivos. Sería de interés que en futuros estudios se contara con el material experimental con: las mismas condiciones de sitio, mismo origen genético y mismo manejo pero diferentes edades para poder evaluar cual es el efecto que esta produce.

La velocidad de crecimiento no esta influenciando las propiedades estudiadas, por lo tanto se puede seleccionar árboles de mayor velocidad de crecimiento sin ir en contra de la densidad, módulo elástico, módulo de rotura. Aunque esto puede ser contradictorio, ya que si se selecciona teniendo en cuenta solamente la velocidad de crecimiento, los años de la rotación de una plantación mejorada en esta característica, bajarían; lo que conlleva a que la proporción de madera juvenil sea mayor, y por lo tanto las propiedades de la madera sean menores. Para aprovechar esta ventaja sería interesante mantener la edad de rotación y por lo tanto obtener mayor cantidad de madera.

6.RESUMEN

Se estudiaron algunas propiedades físicas y mecánicas de *Eucalyptus grandis* procedentes de dos plantaciones, estas últimas presentaban diferencias en: sitio, edad, origen genético y manejo silvicultural. De cada plantación se seleccionaron árboles. Estos árboles fueron apeados y se obtuvieron 3 trozas de cada uno, de estas trozas se obtuvieron piezas, las cuales fueron identificadas por su posición en el radio. A su vez de cada pieza se obtuvieron probetas libres de defectos. Las propiedades estudiadas fueron: densidad aparente básica, densidad aparente al 12% CH, módulo elástico, módulo de rotura y resistencia al impacto. Los estudios se realizaron en piezas tamaño de obra y en probetas libres de defectos. Para medir el módulo elástico se realizaron ensayos de tipo destructivo y no destructivo. Se analizó las correlaciones entre las propiedades y también para una misma propiedad la correlación entre diferentes métodos de medición. Se realizó una comparación entre plantaciones para las diferentes propiedades y se calculó la correlación entre algunas propiedades y la velocidad de crecimiento. También se analizó el comportamiento de todas las propiedades bajo estudio con respecto a la posición en el radio y en la altura.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, clasificación visual, propiedades físicas y mecánicas, densidad, módulo elástico, módulo de rotura, resistencia al impacto.

7.SUMMARY

In this work some physical and mechanical properties of two *Eucalyptus grandis* from 2 different plantation sites were studied. Trees were selected from each site, felled and cut into three logs each. The logs were sawn, and the boards obtained were marked by radial position and visually graded. Small clear specimens were made from each board. Studied properties were: density, modulus of elasticity and bending strength. For this studies boards full sized and small clear specimens were used. Modulus of elasticity was measured using non-destructive and destructive tests. Correlations between properties were studied, also the correlation between different tests for a property. Results from different plantation sites were compared, correlation between properties and growth rate was studied. The performance of the properties was analyzed in longitudinal and transversal way.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, visual grading, physical and mechanical properties, density, modulus of elasticity, bending strength.

8. BIBLIOGRAFIA

1. ACHUGAR, L. A.; SCAGLIONE, G. 2003. Evaluación de propiedades de la madera en clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 97 p.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1994. ASTM D 143-94, standard methods of testing small clear specimens of timber. West Conshohocken, PA. s.p.
3. _____. 1999a. ASTM D 198-98, standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, PA. s.p.
4. _____. 1999b. ASTM D 245-98, standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. West Conshohocken, PA. s.p.
5. ANDRIAMITANTSOA, L. D. 1995. Creep. In: Timber Engineering STEP 1. s.l., Centrum Hout. pp. A19/1-A19/5.
6. BELVISI IRIGOYEN, D. S.; BLANC, P. F.; CALVO, C. F.; COTRINA, A. D.; CUFFRÉ, A. G.; LAROCCA, F. D.; PITER, J.C.; TORRÁN, E. A.; VILLALBA, D. I. 1998. Utilización de nuestras maderas con fines estructurales; análisis y propuesta. In: Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (16as., 1998, Buenos Aires). Anales. Buenos Aires, Asociación de Ingenieros Estructurales. s.p.
7. BHAT, K.M.; BHAT, K.V; DHANODARAN, T.K. 1990a. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. Wood and Fiber Science. 22 (1): 33-40.
8. _____. 1990b. Wood quality improvement of *Eucalyptus* in India; an assessment of property-variations. Journal of the Indian Academy of Wood Science. 21 (2): 33-40.
9. BOTHIG, S. 2001. Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 23 p. (Informe de Investigación no. 5).
10. BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. 1971. Variação de densidade básica da madeira de *E. alba* Reinew, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill ex maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales. no. 2/3: 129-148.
11. _____.; _____. 1972. Variation in basic density and characteristics of the fibers in *Eucalyptus grandis* at b.h. Preliminary analysis. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales. (IPEF).(5): 81-90. Tomado de: CAB Abstract. 1972-1975.

12. BROWN, A. G.; HILLIS, W. E. 1978. General introduction. In: Eucalypts for wood production. Melbourne, CSIRO. pp. 3-5.
13. CHAPOLA, G.B.J.; NGUKUBE, M.R. 1990. Basic density of some hardwood species grown in Malawi. South African Forestry Journal. no.153: 12-17.
14. CENTURION, C.; LLANO, L. 1995. Determinación de peso específico aparente básico por los métodos Unit 237-70 y máximo tenor de humedad con probetas de incremento radial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
15. CORONEL, E. O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, 1ª. parte; fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. Santiago del Estero, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 187 p.
16. _____. 1996. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, 2ª. parte; fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. Santiago del Estero, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 329 p.
17. DOLDAN, J. 2003. Indicadores de calidad de madera de *Eucalyptus grandis* de Rio Negro, Uruguay; contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibras. Montevideo, LATU/JICA. 40 p. (Informe de Investigación no. 9)
18. DOWNES, G. M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, L.R.; EVANS, R.; MUNERI, E.A. 1997. Sampling plantations; Eucalyptus for wood and fiber properties. Australia, CSIRO Publishing. 132 p.
19. EL-HOSSEINY, F.; PAGE, D.H. 1973. The measurement of fibril angle of wood fibers using polarized light. Wood Fiber 5: 208-214.
20. FERNÁNDEZ, E. M. 2004. Selección de clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) por crecimiento y propiedades de la madera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 71 p.
21. GLOS, P. 1995. Solid timber; strength classes. In: Timber Engineering STEP 1. s.l., Centrum Hout. pp. A7/1-A7/8.
22. HARRIS, J.M.; MEYLAN, B.A. 1965. The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. *Holzforchung*. 19 (supl.): 144-153.
23. HILLIS, W. E. 1978. Wood quality and utilization. In: Eucalypts for wood production. W. E. Hillis; A. G. Brown eds. Melbourne, CSIRO. pp. 258-289.

24. LIMA, J.T.; BREESE, M.C.; CAHALAN, C.M. 2000. Variation in wood density and mechanical properties in Eucalyptus clones. In: IUFRO Conference (2000, Valdivia , Chile). Proceedings. Launceston, Australia, Cooperative Research Center for Temperate Hardwood Forestry. pp. 282-291.
25. MALAN, F.S. 1982. Shrinkage and density of mature *E. grandis* (Hill ex Maiden) grown in the Letaba district of Northern Transvaal. CSIR Special Report no. 251. 16 p.
26. _____. 1988a. Genetic variation in some growth and wood properties among 18 full-sib families of South African grown Eucalyptus grandis; a preliminary investigation. South African Forestry Journal. no.146: 38-43.
27. _____. 1988b. Wood density variation in four trees of South African grown Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden). South African Forestry Journal. no. 144: 36-42.
28. _____. 1991. Variation, association and inheritance of juvenil wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth South African Forestry Journal. no. 157: 16-23.
29. _____.; HOON, M. 1992. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal. no. 163: 13-20.
30. _____.; VERRIN, S.D. 1996. Effect of genotype-by-environment interaction on the wood properties and qualities of four-year-old Eucalyptus grandis and E. grandis hybrids. South African Forestry Journal. no. 163: 47-53.
31. O'NEILL, H. 2000. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos. In: Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA; presentaciones en Expoforesta 2000. Montevideo, LATU/JICA. pp. 15-24.
32. OLASO MARI, E. 2002. Estudio de la variación en las propiedades físicas y mecánicas de *E. grandis* (Hill) ex Maiden del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 81 p.
33. PAGE, D.H. 1969 A method for determining fibrillar angle in wood tracheids. J Roy Microsc. Soc. 90: 137-143
34. _____.; EL-HOSSEINY, F.; WINKLER, K.; BAIN, R. 1972. The mechanical properties of single wood-pulp fibers. Part 1; a new approach. Pulp and Paper Magazine of Canada. 73 (8): T198-T203.

35. PEREZ DEL CASTILLO, A. 2001. Propiedades mecánicas y calidad de madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 35 p. (Informe de Investigación no. 4)
36. _____.; VENTURINO CAMAROTA, A. 2003. Resumen de propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pino elliottii* y *Pinus taeda* de distintas zonas del Uruguay”. Montevideo, LATU/JICA. 31 p. (Informe de Investigación no. 14)
37. PEREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S. 2000. Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Montevideo, LATU/JICA. 24 p. (Informe de Investigación no. 1)
38. PITER, J.C., 2003. Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para *Eucalyptus grandis* en Argentina. Tesis Doctorado en Ingeniería. La Plata, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 206 p.
39. STÖHR, H. P.; MACKAY, D.1983. Wood characteristics of young *E. grandis* grown at Wolgeboom plantation Eastern Transvaal. CSIRO Special Report no. 278. 28 p.
40. TAYLOR, F.W. 1973. Variation in the anatomical properties of south African grown *Eucalyptus grandis*. *Appita Journal*. 27 (3): 171-178.
41. THELANDERSSON, S. 1995a. Deformations in timber structures. In: Informationsdienst Holz, STEP 3. Düsseldorf, Fachverlag Holz. pp. 11/1-11/16.
42. _____. 1995b. Serviceability limit states; deformations. In: Timber Engineering STEP 1. s.l., Centrum Hout. pp. A17/1-A17/8.
43. TREACY, M.; EVERTSEN, J.; NI DHUBHAIN, A. 2000. A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sit Ka spruce provenances. s.l., National Council for Forest Research and Development. 30 p.
44. TUSET, R.; DURÁN, F. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
45. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1999. Wood handbook; wood as an engineering material. Washington. s.p. (Agriculture Handbook no. 72)
46. WALKER, J.C.F.; WOOLONS, R.C. 1997. Cell wall organization and the properties of xylem; a speculative review. In: Microfibril angle in wood. B.G. Butterfield ed. Westport, New Zealand, University of Canterbury. pp. 13-26.

47. WILKINS, A. P. 1990. Influence of silvicultural treatment on growth and wood density of *Eucalyptus grandis* grown on a previous pasture site. *Australian Forest Journal*. 53 (3): 168-172
48. _____.; KITAHARA, R. 1991a. Silvicultural treatments and associated growth rates, growth strains and wood properties in 12.5 year-old *Eucalyptus grandis*. *Australian Forestry*. 54 (1/2): 99-104.
49. _____.; HORNE, R. 1991b. Wood density variation of young plantation grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*. 40 (1): 39-50. Tomado de: CAB Abstract. 1990-1991.
50. WRIGTH, J.A.; ENDO, M. 1993. Wood density of four-year-old clones of *Eucalyptus grandis* from sixteen trials in Colombia. *Wood and Fiber Science*. 25 (1): 71-78.
51. ZOBEL, B.; TALBERT, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México, Limusa. 545 p.
52. _____. 1997. Timber management towards wood quality and end-product value. In: International Wood Quality Workshop (1997, Quebec, Canada). Proceedings. s.l, CTIA/IUFRO. pp. 3-7.