

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACION A TURNO FINAL DEL EFECTO DEL RALEO SOBRE
EL CRECIMIENTO Y PROPIEDADES DE LA MADERA DE *EUCALYPTUS*
*GRANDIS***

por

Karen Yanet BAEZ ALBANO

**Trabajo final de grado presentado como
uno de los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Fernando Resquín Pérez

Cecilia Rachid - Casnati

Ana Paula Coelho

Fecha: 3 de febrero del 2023

Autor:

Karen Yanet Báez Albano

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi madre Alba por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A todos mis amigos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada. Gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Agradezco a mis tutores Fernando Resquín, Cecilia Rachid – Casnati, Ana Paula Coelho, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de titulación y brindarme el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores. También a Diego Pasarella por el apoyo en las mediciones del laboratorio del CENUR Noreste.

Y También a Wilfredo Gonzalo, Sebastián Inthamoussu, Federico Rodríguez, Pablo Nuñez, y Juan Pablo Lozano, por el apoyo brindado en las etapas de trabajo de campo y laboratorio.

TABLA DE CONTENIDO

<u>PÁGINA DE APROBACIÓN</u>	<u>II</u>
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	<u>III</u>
<u>LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES</u>	<u>VI</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos:.....	2
1.2 HIPOTESIS	3
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>4</u>
2.1 FORESTACIÓN EN URUGUAY	4
2.2 ECOLOGÍA DE <i>Eucalyptus grandis</i>	7
2.2.1 Eucaliptos.....	7
2.2.2 <i>Eucalyptus grandis</i>	8
2.3. RALEO	9
2.3.1 Manejo del crecimiento y la calidad de madera a través de prácticas silviculturales	9
2.3.2 Definición y objetivos de raleo	9
2.3.3 Tipos de raleo.....	12
2.3.4 Marcación y momento del raleo	13
2.3.5 Efecto del raleo sobre el crecimiento.....	14
2.3.6 Efecto del raleo sobre las propiedades de la madera de <i>Eucalyptus grandis</i>	18
2.3.6.1 Densidad básica.....	20
2.3.6.2 Módulo de elasticidad y módulo de rotura	23
2.4 CORRELACION ENTRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECÁNICAS	27
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	<u>29</u>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	29
3.2 MEDICIONES DE CRECIMIENTO, CALCULO DE VARIABLES DE RODAL Y MUESTREO.....	31

3.2.1 Crecimiento y variables de rodal	31
3.2.2 Muestreo	32
3.3 MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA	35
3.3.1 Preparación y acondicionamiento de probetas.....	35
3.3.2 Densidad aparente básica.....	38
3.3.3 Densidad aparente corriente	41
3.3.4 Resistencia a la flexión estática	47
3.3.5 Resistencia a la compresión paralela a la fibra	42
3.3.6 Contenido de humedad	45
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO	48
<u>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	50
4.1 CRECIMIENTO.....	50
4.1.1 Evolución a lo largo del ciclo	50
4.1.2 Productividad en la edad de 21 años	55
4.1.3 Estimación de trozado a la edad de 7 y 21 años mediante el Sistema de Apoyo a la Gestión – SAG grandis.....	61
4.2 PROPIEDADES DE LA MADERA	64
4.2.1 Densidad aparente básica y densidad aparente corriente.....	64
4.2.2 Resistencia a la flexión estática y resistencia a la compresión paralela a la fibra.....	67
4.3 CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA.....	71
<u>5. CONCLUSIONES</u>	78
<u>6. RESUMEN</u>	79
<u>7. SUMMARY</u>	80
<u>8. BIBLIOGRAFÍA</u>	81
<u>9. ANEXOS</u>	91

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro Nro.	Página
1. Descripción de los tratamientos del ensayo.	30
2. Valores promedios y error estándar (E.E.) de <i>DAP</i> , <i>Ht</i> , <i>Vi</i> , a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Bonferroni (p-valor<0,05).	56
3. Valores promedio y error estándar (E.E.) para las variables <i>Vha</i> , <i>Vha</i> raleo, <i>Vha</i> total a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Kruskal - Wallis (p-valor<0,05)	59
4. Resultados de volumen comercial obtenidos con el simulador de trozado SAG grandis.	62

Figura Nro.	Página
1. Representación esquemática de los discos extraídos.	33
2. Extracción de discos para determinación de densidad básica de la madera.	34
3. Trozado del fuste para extracción de muestras para propiedades de la madera.	34
4. Vista del aserradero móvil marca WoodMizer, modelo LT – 28.	35
5. Vista de Sierra circular de mesa (izquierda) y Sierra sensitiva (Derecha) para confección de probetas	36
6. Representación esquemática de las trozas extraídas para la confección de las probetas libres de defectos.	37
7. Cámara de climatización para acondicionamiento de probetas.	38
8. Saturación de discos en agua para determinación de densidad básica de la madera.	39
9. Medición de volumen de discos para determinación de densidad básica.	39
10. Estufa para secado de discos a 105° para determinación de densidad básica.	40
11. Vista de balanza analítica para medición de peso de probetas.	42

12. Vista calibre digital utilizado en la medición de las dimensiones de las probetas.....	42
13. Izquierda: Estufa de secado de probetas para determinación de contenido de humedad. Derecha: Vista de desecador para minimizar absorción de humedad del ambiente de las probetas.....	47
14. Vista Máquina universal de ensayos Shimadzu, modelo AGS – 100, para determinación de <i>MOE</i> y <i>MOR</i>	43
15. Vista de medición de resistencia a la flexión estática de las probetas.	44
16. Vista de medición resistencia a la compresión paralela a la fibra.....	46
17. Evolución del <i>DAP</i> en función de la edad para cada esquema de raleo. ...	50
18. Evolución de la <i>Ht</i> en función de la edad para cada esquema de raleo.	51
19. Evolución del <i>Vi</i> en función de la edad para cada esquema de raleo.	53
20. Evolución del <i>Vha</i> en función de la edad para cada esquema de raleo.	54
21. Valores promedios de <i>Dabp</i> a la edad de 20.8 años para diferentes esquemas de raleo. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Tukey, (p -valor <0.05).	65
22. Valores promedios de <i>Dac</i> a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Tukey, (p -valor <0.05).	66
23. Valores medios de <i>MOEf</i> a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p -valor 0.05.	68
24. Valores medios de <i>MORf</i> a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p -valor 0.05.....	68
25. Valores medios de <i>MORc</i> a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p -valor 0.05.....	69

26. Valores medios de <i>MOEc</i> a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p-valor 0.05.....	69
27. Correlación existente entre <i>MOEc</i> (MPa) y <i>Dac</i> (g/cm ³).....	72
28. Correlación existente entre <i>MOEf</i> (MPa) y <i>Dac</i> (g/cm ³).....	72
29. Correlación existente entre <i>MORc</i> (MPa) y <i>Dac</i> (g/cm ³).....	72
30. Correlación existente entre <i>MORf</i> (MPa) y <i>Dac</i> (g/cm ³).....	72
31. Correlación existente entre <i>MOEc</i> (MPa) y <i>Dab</i> (g/cm ³).....	73
32. Correlación existente entre <i>MOEf</i> (MPa) y <i>Dab</i> (g/cm ³).....	73
33. Correlación existente entre <i>MORc</i> (MPa) y <i>Dab</i> (g/cm ³).....	74
34. Correlación existente entre <i>MORf</i> (MPa) y <i>Dab</i> (g/cm ³).....	74
35. Correlación existente entre <i>MORc</i> (MPa) y <i>MOEc</i> (MPa).....	75
36. Correlación existente entre <i>MORf</i> (MPa) y <i>MOEf</i> (MPa).....	75
37. Correlación existente entre <i>Dab</i> (g/cm ³) y <i>Dac</i> (g/cm ³).....	76

1. INTRODUCCIÓN

La forestación en Uruguay ha tenido una creciente evolución a lo largo de los años debido a una política de incentivos a las actividades relacionadas a la cadena agroforestal. A consecuencia de esto y por las condiciones favorables que tiene el país para este tipo de plantaciones, actualmente existen 1087109 hectáreas efectivas plantadas, de las cuales un 70% corresponde a especies de *Eucalyptus* (MGAP. OPYPA, 2021).

Parte de esta área está ocupada por *Eucalyptus grandis*, siendo ésta una de las especies forestales de mayor importancia en nuestro país. La especie presenta características favorables para su utilización como madera estructural, así como para la producción de madera libre de singularidades, también llamada *madera clear*. Un alto porcentaje de la superficie que ocupa *Eucalyptus grandis* tiene como destino final el aserrado, lo que implica que son plantaciones que fueron sometidas a sucesivas podas y raleos con el fin de obtener madera de calidad (grandes diámetros y ausencia de nudos).

Así mismo, es de fundamental importancia conocer los aspectos de manejo de la especie, que influyen y determinan el crecimiento y calidad de la madera, así como la utilización del raleo para concentrar el crecimiento del rodal en los mejores árboles que serán los remanentes hasta el turno final. Cabe mencionar que el raleo es una práctica de manejo utilizada por las empresas concentradas mayormente en las zonas norte y litoral de Uruguay, cuyo producto principal es la madera sólida.

Esta práctica silvicultural podría favorecer el incremento en diámetro y trozas de calidad necesarias para el abastecimiento de aserraderos y plantas de debobinado. Además, este tipo de prácticas podrían estar afectando a la

densidad de la madera, la cual tiene una relación muy estrecha con sus propiedades físico-mecánicas. Para uso estructural es clave tener en cuenta las propiedades mecánicas, tales como resistencia y rigidez ante distintos tipos de esfuerzos.

A su vez, es de suma importancia estudiar la influencia que los defectos ejercen sobre esas propiedades, lo cual determina la necesidad de comprender el efecto de las distintas intensidades y frecuencias de raleo en la densidad y de forma indirecta su influencia en las propiedades físico-mecánicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del raleo sobre el crecimiento, y las propiedades de la madera de *Eucalyptus grandis*.

1.1.2 Objetivos específicos:

1. Evaluar el efecto de distintos esquemas de raleo en el crecimiento individual y por hectárea al momento del raleo y a turno final.
2. Conocer el efecto de esquemas de raleo contrastantes sobre las propiedades físicas y mecánicas.
3. Analizar la relación entre la densidad de la madera y el módulo de elasticidad y de rotura en probetas de pequeñas dimensiones.

1.2 HIPOTESIS

La hipótesis del presente trabajo es la siguiente:

Las diferentes intensidades de raleo afectan de forma diferente el crecimiento y propiedades de la madera de *Eucalyptus grandis*.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORESTACIÓN EN URUGUAY

Con la primera ley forestal Nro. 13723 de la década de los 70, se buscó incentivar la forestación para poder abastecer el mercado interno, en un país que era mayormente agrícola ganadero (FAO, 2004). Pero no fue hasta 1987 con la aprobación de la segunda ley forestal (Nro. 15939) que se observó un aumento importante en hectáreas plantadas (Arbeletche y Guibert, 2018). En los 10 años posteriores a la aprobación de esta segunda ley, Uruguay logró aumentar sus exportaciones madereras en una relación superior al 2000 % (FAO, 2004).

La plantación de los montes forestales fue incentivada mediante subsidios y exoneraciones impositivas que fueron otorgados a través de la segunda ley forestal, en suelos definidos de prioridad forestal (Arbeletche y Guibert, 2018). A consecuencia de estos incentivos, las plantaciones industriales tanto de *Pinus spp.* como de *Eucalyptus spp.* aumentaron considerablemente. Estas plantaciones se las utiliza para producir pulpa de celulosa, madera sólida y energía (Oyhantçabal, 2005). La mayor parte de las plantaciones cuentan con certificación de la gestión forestal sostenible y cadena de custodia de sus productos, permitiendo una correcta trazabilidad y procurando la sostenibilidad de los diferentes procesos involucrados (MGAP. OPYPA, 2018).

Además de los incentivos de las políticas públicas de la ley 15939, los de la ley 16906 aprobada en 1998, también promovieron la inversión en el sector (MGAP. OPYPA, 2020), ya que promovían la inversión directa nacional y extranjera. Posteriormente, las plantaciones forestales continuaron aumentando en el país ocasionando el desarrollo de otras industrias, que son las dos principales cadenas industriales: transformación mecánica (aserrío y debobinado) y las plantas de producción de celulosa. Además, se exporta chips

y madera en rolos que también se destina a pulpa o aserrío en los países de destino (Uruguay XXI, 2021).

Las ventajas comparativas (adecuado marco legal, buena logística que aún está en proceso de mejora, así como la inexistencia de conflictos territoriales y un estable contexto político, socio-cultural) frente a otros países, explican que varias empresas extranjeras hayan invertido en Uruguay (MGAP. OPYPA, 2018). Tales empresas, como UPM, Montes del Plata y Lumin, están instaladas en Uruguay desarrollando sus actividades e impulsando el sector debido a sus grandes demandas, tanto en la necesidad de personal profesional como de requisitos técnicos (Uruguay XXI, 2021).

En la actualidad se cuenta con 1087109 hectáreas efectivas plantadas, que representan el 6.21% de la cobertura del país. Se destaca que actualmente 4210077 hectáreas de suelos son de prioridad forestal (MGAP. OPYPA, 2021).

Uruguay tiene buenos niveles de competitividad a nivel internacional, debido a sus condiciones de clima y suelo (Uruguay XXI, 2021). Por tal motivo, a nivel de exportaciones los productos forestales uruguayos llegan a alrededor de 60 países (MGAP. OPYPA, 2018).

Según la sociedad de productores forestales (SPF, 2022, MGAP. DGF, 2021) existen tres zonas forestales bien marcadas en Uruguay que corresponden a:

- Zona litoral oeste y centro: abarca los departamentos de Durazno, Paysandú, Río Negro y Soriano; tiene como destino principal pasta de celulosa; y las especies plantadas en mayor medida son *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*.

- Zona Noreste y Sureste: en ella se encuentran los departamentos de Lavalleja, Maldonado, Melo y Treinta y Tres; tiene como destinos celulosa y madera sólida; cuenta con todas las especies, y las mayormente plantadas son *Eucalyptus grandis* en el norte y *Eucalyptus globulus*, *E. dunnii*, *P.taeda* y *P. ellioti* y *E. smithii* en el sur.

- Zona norte: corresponde a la zona donde fue realizado este ensayo, se ubica en los departamentos de Rivera y Tacuarembó; su destino principal es madera sólida (aserrado – debobinado); las especies de pino son las que están plantadas en mayor proporción (65% aproximadamente), pero esto va en decremento, y las especies de *Eucalyptus* tienen una importante presencia de aproximadamente un 35%.

En la actualidad el sector forestal representa un 3% del PIB nacional con una tendencia creciente con exportaciones (madera, celulosa y papel) que representan aproximadamente una quinta parte del total de exportaciones de bienes del país. Las exportaciones de madera sin incluir zona franca tienen un comportamiento oscilante en los últimos años, sin embargo, las ventas fueron un 42% superior con respecto al quinquenio pasado, posicionándose las exportaciones de madera y subproductos, en el año 2020, en los US\$ 347 millones (Uruguay XXI, 2021).

Según la última encuesta de aserraderos del país, llevada a cabo por la Dirección General Forestal, existen 77 emprendimientos los cuales asierran una sola especie o un grupo de especies, ya sea de pino o eucalipto. Estos están ubicados en tres zonas: Tacuarembó – Rivera, que es la que tiene mayor capacidad (877601 m³) y dinamismo, Paysandú (143965m³), y la zona metropolitana (58557m³) (Boscana y Boragno, 2020).

Según Boscana y Boragno (2020), para el género *Eucalyptus spp* el consumo de madera rolliza fue de 414999 metros cúbicos, de los que *Eucalyptus grandis* tiene un 95% de consumo, *E. camaldulensis* y/o *E. tereticornis* un 4.7% y *E. saligna* un 0.3%.

2.2 ECOLOGÍA DE *Eucalyptus grandis*

2.2.1 Eucaliptos

Los eucaliptos integran la familia *Myrtaceae* y cuentan con alrededor de 950 especies nativas y endémicas de Australia, y debido a su amplia variedad de características morfológicas y de tamaño, actualmente se los clasifica en los géneros *Eucalyptus*, *Angophora* y *Corymbia* (Barros, 2012).

La distribución natural de las especies en Australia depende de distintas situaciones ecológicas, que están determinadas por condiciones climáticas y edafológicas (Brussa, 1994). Estas especies se han adaptado a amplias condiciones ambientales (desérticas y templadas), dominando en áreas de mayores precipitaciones (Barros, 2012, Granados y López, 2006). Los eucaliptos se extienden naturalmente entre los 7° N y 43 ° S de latitud (FAO, 1981, Brussa, 1994), y los lugares donde no están distribuidos son algunos bosques lluviosos más húmedos de Nueva Gales del Sur y Queensland (Granados y López, 2006).

En plantaciones forestales son numerosas las especies de importancia correspondientes al género *Eucalyptus* en distintos continentes, pero las de mayor importancia corresponden a *E. camaldulensis*, *E. urophylla* y *E. pellita* en

climas tropicales, y para climas templados son *E. grandis*, *E. globulus*, *E. dunnii*, *E. nitens*, *E. tereticornis* y *E. smithii* (Barros, 2012).

2.2.2 *Eucalyptus grandis*

Esta especie se distribuye naturalmente en zonas costeras de Queensland y Nueva Gales del sur, en los 16° a 35° S (MARENA. INAFOR, 2002). Es un gran árbol de fuste recto (Brussa, 1994) que puede superar alturas de 55 metros y tener diámetros máximos de un metro, pero en su área natural, si están bien desarrollados, pueden alcanzar los 2 metros de diámetro (MARENA. INAFOR, 2002).

Eucalyptus grandis necesita para su instalación una adecuada preparación del suelo, dejándolo sin compactación y libre de malezas, ya que es muy sensible a las mismas y no prospera en suelos compactados (CATIE, 1994, MARENA. INAFOR, 2002). Presenta altas tasas de crecimiento y se adapta a un amplio rango de suelos. Su madera es ligera, más suave y se fisura más que los otros eucaliptos (MARENA. INAFOR, 2002).

Según la nueva cartografía forestal, *Eucalyptus grandis* es una de las especies que abarca mayor superficie forestal ocupando 250964 hectáreas (MGAP. OPYPA, 2021). A raíz de la expansión forestal en Uruguay, se utiliza esta especie para producir madera aserrada, productos derivados de su transformación (aserraderos, mueblerías, fábrica de tableros contrachapados, etc.) y pulpa de celulosa (Cueto et al., 2013).

2.3. RALEO

2.3.1 Manejo del crecimiento y la calidad de madera a través de prácticas silviculturales

La cantidad y calidad de la madera producida pueden ser modificados o controlados por medio de tratamientos silvícolas. Entre los manejos silviculturales que posibilitan la alteración de condiciones, tasas de crecimiento y valor comercial de los árboles que tienen como propósito producir madera de calidad, se destacan, la fertilización, el raleo y la poda (Cueto et al., 2013, Lima y García, 2010). La calidad de la madera varía para cada propósito específico según el producto. Algunos de los aspectos considerados para caracterizarla son densidad, uniformidad de anillos de crecimiento, porcentaje de madera libre de nudos, proporción de madera de verano, y producción de celulosa (Espinosa y Muñoz, 2005).

Según Nutto y Touza (2006) la madera aserrada de calidad corresponde a fustes de diámetro a la altura del pecho mayor a 40 cm y libre de nudos, por lo menos en trozas inferiores. Esto es posible de obtener potenciando el crecimiento en diámetro, realizando raleos que le permiten a los árboles remanentes aprovechar el espacio que tienen disponible, los cuales deben estar acompañados de podas que garanticen un cilindro nudoso reducido.

2.3.2 Definición y objetivos de raleo

Los objetivos del raleo varían según las circunstancias locales, dependiendo de la naturaleza y tasa de crecimiento del cultivo, de la disponibilidad de mano de obra, el financiamiento, y accesibilidad de mercados

para los productos a cosechar (Shepherd, 1986). Uno de los principales objetivos de esta práctica silvicultural es poder producir madera con altos niveles de crecimiento individual y de calidad acorde con los requerimientos de la industria (Lima y García, 2005).

El raleo es una técnica silvícola para producir madera aserrada de calidad, donde se realizan cortes parciales en las masas forestales inmaduras (Lima y García, 2005). Esto permite el aprovechamiento de forma anticipada de parte del volumen del monte que sufriría muerte natural causada por competencia (García et al., 2017).

Al mismo tiempo que se acelera el crecimiento en diámetro, se mejora la conformación del monte, dejando un remanente más homogéneo mediante una adecuada selección de individuos (Shepherd, 1986). Debe tenerse presente que siempre se debe buscar quedar con un rodal lo más homogéneo posible (García et al., 2017).

Con esta técnica se reduce el número de árboles por hectárea, aumentando así el volumen de madera de los árboles remanentes ya que el crecimiento se concentra en un menor número de individuos, obteniendo mayores diámetros al final de la rotación y/o una fecha de corte final más corta (Cueto, 2012, Carpineti et al., 1995). Según García et al. (2017) esto se debe a que la sobreocupación o subocupación del sitio influye en el crecimiento del área basal que es quien determina el volumen final, además el raleo provoca una disminución en el volumen total en comparación con rodales sin raleo, pero esta disminución de volumen debe ser compensada mediante el mayor valor del producto obtenido.

Según datos obtenidos de Larocca et al. (2004) donde aplicaron un número creciente de raleos y lo relacionaron con los volúmenes producidos, se obtiene que después de cada raleo hay un descenso abrupto del área basal a raíz de que se retira parte del volumen. No obstante, no hay pérdidas significativas ya que el nuevo crecimiento se distribuye en menos árboles de mayor diámetro y mejor forma. Estos autores concluyeron que la producción remanente a 12 años resulta inversamente proporcional al número de raleos, pero cuando se le suman las extracciones que se realizaron, las producciones totales son similares.

Las ventajas de producir árboles de mayor diámetro se evidencian en el rendimiento en el aserrado y en la calidad de la madera obtenida (García et al., 2017). Por lo tanto, el raleo es imprescindible cuando se necesitan trabajar con grandes diámetros como en el caso del aserrado y laminado (Carpinetti et al., 1995).

El raleo también es indispensable al momento de mantener el estado sanitario del rodal, evitando grandes mortalidades, pobres crecimientos e implementación de costosos programas de control de plagas y enfermedades (Shepherd, 1986). Es por lo que la selección individual de los árboles a ralear se basa en algunos criterios como la forma, diámetro y estado sanitario, raleando así los que sean bifurcados y tortuosos, aquellos individuos que se encuentran dominados y árboles con problemas sanitarios. En algunos casos donde estos individuos no fueran suficientes para completar el raleo, se deben seleccionar también árboles codominantes (Carpinetti et al., 1995).

2.3.3 Tipos de raleo

Según su aprovechamiento, los raleos se pueden clasificar en precomerciales o a desecho (realizado de forma temprana en el rodal) y comerciales (realizado en etapas posteriores en el ciclo del rodal, donde los árboles raleados son comercializables). Esto controla el espaciamiento de los árboles, incrementando su diámetro, y en algunas especies el crecimiento en altura de rodales jóvenes (Walstad y Kuch citados por Espinosa y Muñoz, 2005).

Cabe destacar que el raleo a desecho es llamado así por el escaso volumen y tamaño de los árboles que no pueden ser comercializados de manera rentable (García et al., 2017). Daniel, Smith et al., citados por Espinosa y Muñoz (2005), indican que el raleo comercial, corresponde a la remoción de los fustes aprovechables para obtener ingresos y/o regular la estructura del rodal para rendimientos futuros.

Según Espinosa y Muñoz (2005) tomando como criterio los árboles a extraer, se pueden identificar cinco tipos de raleo:

- Raleo por lo bajo: extrae principalmente árboles de posiciones subordinadas (clases de copa inferiores), siendo éstos los que poseen una mayor probabilidad de morir por supresión.
- Raleo por lo alto: remueve mayoritariamente árboles codominantes y en algunos casos dominantes de mala forma, favoreciendo el desarrollo de los árboles más promisorios. Un volumen substancial de madera puede ser removido, sin reducir fuertemente el volumen total de madera futura y su valor.

- Raleo de dominantes: remueve árboles dominantes para que los codominantes e intermedios puedan expandirse.
- Raleo sistemático: no considera las características de los individuos y se remueven árboles de todas las clases diamétricas. En el caso de que fuese estrictamente en la fila, solo los individuos adyacentes a esta se verán liberados de competencia. Puede usarse en rodales jóvenes y densos para mejorar el acceso.
- Raleo libre: combina a todos los tipos de raleo mencionados anteriormente, sin particular peso en un tipo de raleo. Se justifica en bosques naturales donde hay una heterogeneidad de edades, densidades y composición.

2.3.4 Marcación y momento del raleo

Según García et al. (2017), los sucesivos raleos se pueden realizar desde que comienza la competencia en el rodal hasta unos años antes de su cosecha. Su frecuencia depende de la edad del rodal, la especie y la intensidad con la que se realizan los mismos. La secuencia total de operaciones es conocida como régimen de raleo, y depende del momento, el tipo e intensidad y el intervalo entre los mismos (Espinosa y Muñoz, 2005).

La oportunidad de raleo se determina mediante datos de área basal y crecimiento, determinándose el momento óptimo cuando la competencia entre los individuos del rodal comienza a afectar su crecimiento (Carpinetti et al., 1995).

El primer raleo se puede realizar cuando las copas de los árboles comienzan a tocarse, las ramas inferiores comienzan a secarse y hay escasa vegetación herbácea. Los sucesivos raleos deben realizarse cuando los árboles vuelven a tocar sus copas. Los individuos raleados pueden tener como destino el aserrío o la producción de pulpa, según los diámetros en punta fina (García et al., 2017).

La ejecución y número de raleos requiere una planificación de la edad a la cual se comenzará con el primer raleo y a las cuales se seguirán con los posteriores. Esta planificación depende mucho del sitio y, en situaciones de altas tasas de crecimiento, se puede hacer el primer raleo a los 2 años (Carpineti et al., 1995).

Malan (2005) en un estudio de *Eucalyptus grandis* de 23 años, confirma que la rapidez de crecimiento no solo beneficia la producción en volumen, sino que también, en rotaciones largas asegura una proporción mayor de madera homogénea en cuanto a densidad.

2.3.5 Efecto del raleo sobre el crecimiento

Según Balloni y Simões (1980), la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP), en mayor medida, pueden modificarse con el espaciamiento de las plantaciones y afectan tanto al volumen total de madera como al volumen útil producido por el bosque. Esto ocurre debido a que los rodales más densos producen un mayor volumen total de madera que los rodales menos densos, y los espaciamientos más grandes producen mayor cantidad de árboles con mayor volumen individual.

En un experimento realizado por el Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) en *Eucalyptus grandis*, a medida que disminuía el espaciamiento, disminuía la altura promedio, pero la altura promedio del 15% de árboles dominantes no cambiaba significativamente. Por el contrario, al realizar raleo se dejan los árboles dominantes, lo que aumenta su altura promedio (Balloni y Simões, 1980). El crecimiento en altura está definido por la calidad del sitio, viéndose afectado exclusivamente en casos donde se reduce severamente su densidad o en casos donde permanece muy denso (García et al., 2017).

Según García et al. (2017), el aumento del volumen total depende del crecimiento en área basal el cual puede ser alterado por subocupación o sobreocupación del sitio. Además, en el mismo estudio pudieron observar que los esquemas de raleo con menor número de árboles por hectárea obtuvieron el menor volumen por hectárea (*Vha*). Al analizar esta variable según clases diamétricas observaron que el volumen se concentra hacia las clases mayores cuanto más se reduce la densidad (sin importar cantidad de raleos aplicados). Por lo tanto, el raleo permite aumentar el volumen y valor de árboles remanentes.

Según Schõnau, Meskimen y Franklin, citados por Balloni y Simões (1980) observaron que el volumen útil puede no variar a pesar de que la producción volumétrica total de madera es mayor en rodales con mayor número de árboles, donde el volumen útil se mantiene y la producción de diámetros finos aumenta a medida que aumenta el número de árboles por área. En determinadas especies el volumen útil aumenta al aumentar el espaciamiento, aunque el volumen total disminuye. Estos casos son más viables a medida que se requieren maderas de mayor calibre. Además, a mayor número de árboles por unidad de superficie, mayor será el volumen total de madera producido (Balloni y Simões, 1980).

Van Laar (1961), en un estudio en *Eucalyptus saligna*, observó que el volumen comercial (hasta 7,6 cm) de los árboles dominados (de 9 a 12 m de altura) disminuyó con el aumento de árboles por hectárea, mientras que el volumen útil de las clases de árboles con 12 a 15 m de altura no fue cambiado. Por otro lado, el volumen útil de los árboles dominantes (20 a 30 m de altura) aumentó al disminuir el espaciamiento de plantación. Balloni y Simões (1980) resaltan que espaciamientos no adecuados pueden ocasionar un excesivo número de árboles dominados, influyendo negativamente en el volumen útil y posiblemente en el volumen total.

Trevisan (2006) realizó un estudio en Brasil sobre *Eucalyptus grandis* de 14 años de edad, con cuatro tratamientos: T1, testigo sin raleo, (1638 árb./ha), T2 (1150 árb./ha), T4 (589 árb./ha) y T8 (192 árb./ha), de manera que estos últimos tres tratamientos consistían en el mantenimiento de aproximadamente el 70, 40 y 10% del área basal de control, respectivamente. Los resultados obtenidos indican que raleos más intensos provocan aumentos en el *DAP*, altura y volumen de árboles medianos, sin embargo, no influyó en los árboles dominantes.

Barrios et al. (2016) observaron que para *Eucalyptus grandis* de la región sur de la Mesopotamia Argentina, el *DAP* y altura son mayores en las tres parcelas con raleo (746, 275 y 76 árboles/ha) comparadas a las sin raleo (1587 árboles/ha); además, observaron que a mayor edad las diferencias en *DAP* son aún más pronunciadas.

Díaz et al. (2012) encontraron, para *Eucalyptus nitens* con cinco tratamientos de raleo a los 7 y 9 años de edad, que a los 15 años el *DAP* tiende a disminuir a medida que el número de árboles remanentes aumenta. Los dos tratamientos de raleos intensos (300 y 400 árboles residuales por hectárea)

fueron estadísticamente diferentes respecto al *DAP* del testigo (1070 árboles por hectárea), alcanzando valores promedio mayores de 9.3 y 5.9 cm, respectivamente a la edad mencionada.

En ensayos de intensidad y número de raleos en *Eucalyptus*, Espinosa y Muñoz (2005) registraron en parcelas con raleo intermedio, un mayor crecimiento en altura en comparación con la parcela testigo y parcelas intensamente raleadas. No obstante, en el ensayo de Díaz et al. (2012), el crecimiento en altura de los árboles no se vio afectado por la intensidad del raleo, sin embargo, mostró una tendencia decreciente con el número de árboles remanentes, registrándose diferencias entre el tratamiento de menor densidad residual y el testigo de aproximadamente dos metros de altura. En el estudio de Barrios et al. (2016), la altura promedio de las parcelas sin raleo fue menor que la observada en las parcelas con raleo.

En el contexto de Uruguay, distintos trabajos fueron realizados con el objetivo de evaluar el efecto de los raleos, donde a grandes rasgos se puede observar que las distintas intensidades de raleo afectan de forma significativa las variables de crecimiento (Methol, 1999, Cueto, 2012).

En el estudio en *Eucalyptus grandis* de 19 años de edad realizado por Cueto (2012) en Tacuarembó (Uruguay), se encontraron diferencias significativas en el *DAP*, altura y el volumen promedio por árbol entre el tratamiento testigo y los tratamientos con raleo. En este estudio instalado a los cinco años de edad, se aplicaron dos intensidades de raleo: muy fuerte (272 árb./ha y uno suave (336 árb./ha) que fueron repetidos dos veces, más el testigo sin raleo (1352 árb./ha). El mismo autor, considerando el volumen total por hectárea (volumen actual más volúmenes obtenidos del raleo precomercial) como indicador de productividad del sitio, pudo observar que para tratamientos fuerte, medio y testigo (sin raleo) no

existen diferencias significativas. Lo anterior indicaría que es factible obtener individuos de mayor *DAP* sin disminuir la productividad por hectárea.

Methol (1999), en un estudio en Tacuarembó (Uruguay) sobre *Eucalyptus grandis* instalado a los cuatro años de edad, observó que, a los 15 meses posteriores al raleo, el *DAP* promedio fue mayor en parcelas con mayores intensidades de raleo, ocurriendo lo mismo con la altura promedio. En cuanto al *Vha*, a los 8 meses posteriores al raleo se pudo observar que en términos absolutos fue mayor en las parcelas testigo por una ocupación total del sitio, decreciendo a medida que el raleo se hace más intenso. Sin embargo, el incremento relativo fue mayor en mayores intensidades de raleo. Cabe mencionar que en este ensayo se aplicaron tres intensidades de raleo: fuerte (450 árb./ha), medio (600 árb./ha) y suave (750 árb./ha), más el testigo (1000 árb./ha).

Según García et al. (2017) el volumen total por hectárea no es un buen indicador de productividad cuando el manejo aplicado tiene como objetivo obtener madera para aserrado, esto es debido a que en estos casos características tales como diámetro en punta fina, cantidad y tamaño de nudos, baja conicidad y curvaturas, tienen mayor peso.

2.3.6 Efecto del raleo sobre las propiedades de la madera de *Eucalyptus grandis*

Las propiedades físicas de la madera determinan cómo se comporta la misma mediante factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin afectar química ni mecánicamente la estructura interna. Además, dependen de la cantidad de sustancia básica, disposición y orientación de los materiales que

forman la pared celular, de los porcentajes de sustancias estructurales o de material celulósico del leño, su composición química y el contenido de agua que presenta (Coronel, 1994a).

Las propiedades de la madera se reúnen en cuatro grupos: anatómicas, químicas, físicas y mecánicas (Coronel, 1994a). Según Lima y García (2005) las propiedades físicas y mecánicas, son las características más relevantes que contribuyen a definir el uso más adecuado desde el punto de vista de la calidad de uso para su procesamiento.

Estas propiedades físicas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a. Peso específico real y aparente (densidad básica);
- b. Contenido de humedad;
- c. Hinchamiento y contracción;
- d. Propiedades acústicas;
- e. Propiedades eléctricas;
- f. Propiedades térmicas;
- g. Propiedades de rozamiento;

En lo que respecta a las propiedades mecánicas de la madera, son las que indican el comportamiento, aptitud y capacidad de resistencia, principalmente a las deformaciones cuando sobre ésta actúan cargas externas (Coronel, 1994a). Se entiende por fuerza externa, cualquier fuerza que, actuando exteriormente, altere su tamaño, dimensión o la deforme (CORMA, 2004).

2.3.6.1 Densidad básica

De la densidad aparente dependen la mayoría de las características físicas y mecánicas (Coronel, 1994b). Cabe destacar que, la densidad aparente o peso específico, está íntimamente relacionada con la resistencia mecánica y tiene una alta correlación con otros indicadores de calidad de la madera (Doldán, 2003). Además, tiene un gran efecto en el rendimiento, resistencia y calidad en los productos de la madera (Zobel y Buijtenen, 1989). Según Coronel (1994b), a mayor densidad, mayor será la resistencia de la madera a acciones mecánicas, ya que contiene más tejido leñoso por área en la pared celular.

La densidad se relaciona con la humedad, por lo que al mencionarla se debe especificar con qué valores de humedad fue determinada. La densidad básica se puede definir como la relación entre la masa seca (0 % humedad) y el volumen verde de un cuerpo. En maderas más livianas, esta densidad varía de 0.1 a 0.3 g/cm³, y entre 1.2 a 1.4 g/cm³ para las más pesadas. Además, debido a que la variación volumétrica está en función del contenido de humedad, la densidad aparente varía para los distintos contenidos de humedad (Coronel, 1994b).

Estudios realizados en Brasil obtienen como resultados que la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* está influenciada por el raleo, pero no por sus distintas intensidades (Lima y García, 2005, 2010, Trevisan et al., 2012, Trevisan, 2006).

Trevisan (2006) realizó un estudio en *Eucalyptus grandis* de 14 años de edad, con cuatro tratamientos: T1, testigo sin raleo, (1638 árb./ha), T2 (1150 árb./ha), T4 (589 árb./ha), T8 (192 árb./ha), de manera que estos últimos tres

tratamientos consistían en el mantenimiento de aproximadamente el 70%, 40% y 10% del área basal de control, respectivamente. Los resultados mostraron que la densidad básica (determinada obteniéndose volumen verde por el método de balanca hidrostática) de los árboles medianos estuvo influenciada por el raleo, no mostrando clara tendencia en relación con la intensidad de la intervención.

Lima y García (2010) en un estudio en *Eucalyptus grandis* de 21 años, encontraron que la densidad aparente no fue influenciada significativamente por las distintas intensidades del raleo selectivo realizado (37, 50 y 75%) a los 5 años de edad. Sin embargo, Lima y García (2005) encontraron que la densidad básica fue influenciada por el raleo, ya que de los 5 esquemas de raleo con los siguientes árboles remanentes por hectárea: 1511, 978, 770, 583 y 360; obtuvieron diferencias significativas en dos de ellos (770 y 583 árboles/ha), pudiendo concluir que el raleo influyó en la densidad básica, ya que hubo diferencia entre las intensidades de 67 y 75%. En general hubo una tendencia a disminuir los valores con mayor intensidad de raleo.

Trevisan et al. (2012) en un estudio sobre *Eucalyptus grandis* de 18 años de edad, en el que se realizaron seis tratamientos de raleo (1176, 784, 588, 392, 294 y 196 árboles/ha) más un testigo (1969 árboles/ha), observaron que el raleo aumenta la variación de la densidad básica, no observando una tendencia sistemática positiva o negativa en relación al espacio vital proporcionado por el raleo. Sin embargo, encontraron que el análisis de los estratos agrupados mostró que intervenciones superiores a dos raleos no aumentan la densidad básica de la madera.

Resquín et al. (2019) al analizar una plantación de *Eucalyptus grandis* a distintas densidades pudieron determinar que los valores más altos de densidad

básica se dan en menores densidades de siembra, confirmando en el estudio que la densidad de plantación afecta la densidad de la madera.

Díaz et al. (2012) realizaron un análisis en *Eucalyptus nitens* de 15 años de edad con un único raleo a los 7 años (T1 con 300 árboles/ha remanentes, T2 con 500 árboles/ha remanentes y T3 con 700 árboles/ha remanentes), dos tratamientos de raleo uno a los 7 años y otro a los 9 años (T4 con 300 árboles/ha remanentes y T5 con 400 árboles/ha remanentes), más el testigo sin raleo (T6) con 1070 árboles/ha encontró que a partir del análisis de los datos no se detectaron diferencias significativas de la densidad básica entre los tratamientos de raleo, obteniendo valores de 0.473 y 0.492 g/cm³.

La densidad básica en *Eucalyptus nitens* fue mayor en los tratamientos con raleo (0.503 g/m³), que en aquellos sin ninguna intervención (0.496) (Navarrete et al., 2009).

La madera de los árboles que crecen con mayores espaciamientos alcanza niveles de densidad máximos y producen madera adulta a temprana edad, en comparación a cuando se cultiva con menores espaciamientos (Malan y Hoon, 1992). Según Carrillo et al. (2015), las maderas adultas de *Eucalyptus* se caracterizan por contener alta densidad, fibras más grandes y paredes más gruesas. Souza et al, citado por Resquín et al. (2019), indican que el espaciamiento de los árboles, a través de la competencia por la luz entre los individuos también puede influir en la capacidad de producción de fotoasimilados y, por lo tanto, de celulosa que se almacena en las paredes de las fibras, contribuyendo a un aumento de densidad básica. Además, Kojima et al. (2009) registran que la densidad del xilema no se ve afectada por el crecimiento en diámetro de *E. grandis*. De acuerdo a Zobel y Jett (1995) esto es común en especies de eucaliptos, las cuales presentan porosidad difusa.

Otro factor que afecta la densidad de la madera es la temperatura, donde a mayores temperaturas hay una reducción en el área transversal de la luz de los vasos del xilema y las células de fibra, y ocasionan un aumento en el espesor de la pared de *E. grandis* (Thomas et al., 2006).

2.3.6.2 Módulo de elasticidad y módulo de rotura

El módulo de elasticidad (*MOE*) es la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud, constituyendo una medida de la rigidez o flexibilidad de la madera. Cuanto mayor es su valor, mayor será la rigidez. Esta propiedad varía entre y dentro especies, y con el contenido de humedad y densidad de la madera (Kretschmann, 2010).

La elasticidad es la propiedad de un material mediante la cual recupera sus dimensiones originales al descargarse, y la determinación de la misma se realiza mediante deformación elástica utilizando probetas, a través de distintos tipos de ensayos estáticos o dinámicos. En algunas situaciones es importante determinar el valor del coeficiente de deformación, o su valor recíproco que es el *MOE* (Coronel, 1994b). Es decir que, las deformaciones producidas por esfuerzos bajos son completamente recuperables después de que se eliminan las cargas (Kretschmann, 2010).

El módulo de rotura (*MOR*) refleja la capacidad de carga máxima de una pieza en flexión y es proporcional al momento máximo soportado por la madera (Kretschmann, 2010). Es decir, es el esfuerzo unitario máximo aplicado en una probeta de madera en el momento de su rotura.

Si se excede el límite elástico en un material de madera, se producen cambios en su interior, que ocasionan en primera instancia, una deformación que no es proporcional al esfuerzo. Si este esfuerzo se eleva aún más y se sobrepasa el límite de rotura, se afectará la composición y distintas sustancias estructurales internas de la madera, hasta que el cuerpo se fractura (Coronel, 1994b).

La elasticidad implica que las deformaciones producidas por esfuerzos bajos son completamente recuperables después de que se eliminan las cargas. Cuando se carga a niveles de tensión más altos, se produce una deformación plástica o una falla (Kretschmann, 2010).

A continuación, se presentan los resultados de una serie de estudios donde se puede observar la variación existente de *MOE* y *MOR* para *Eucalyptus grandis*.

En un trabajo realizado por Bustos (2020), se sometieron 63 probetas de dimensiones 75x5x5cm a ensayos de flexión con una prensa universal de 500 MPa de presión, obteniendo valores para *MOE* y *MOR* de 80.02 MPa y 1678.90 MPa, respectivamente mostrando gran elasticidad y un porcentaje de rotura moderado.

García y Tarigo (2006) en Durazno, Uruguay, para una plantación de *Eucalyptus grandis* de 30 años, realizaron ensayos de flexión estática en probetas de dimensiones 2.5x2.5x 40cm, obteniendo como resultados valores de 13.547 y 84,89 MPa para *MOE* y *MOR* respectivamente.

Gonçalez et al. (2006) en un estudio de *E. grandis* de 17 años en Brasil, determinó para probetas de 5x5x15cm con 12 % humedad, mediante ensayos de flexión estática los valores de *MOR* (MPa) y *MOE* (MPa) de 84.14 y 15647.59,

respectivamente. Montes y Rubbo (2008) encontraron valores promedios de *MOE* y *MOR* de 8796.98 y 83.76 MPa, respectivamente.

Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2004) encontraron en probetas de *Eucalyptus grandis* de 12 años, realizando ensayos de flexión estática valores de *MOE* y *MOR*, de 11766 y 83.2 MPa, respectivamente. Además, en este mismo estudio realizaron ensayos en tablas de dimensiones comerciales, donde los valores de *MOE* y *MOR* fueron inferiores (11607 y 50.6, respectivamente) que los de las probetas. Dicha diferencia de 32.9% inferiores, ocurre debido a que esta propiedad está negativamente influenciada por los defectos de las tablas.

Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2005) encontraron en probetas con 11.5% de humedad de *Eucalyptus grandis* de 18 años, realizando ensayos de flexión estática valores de *MOE* y *MOR*, de 11628 y 72.5 MPa, respectivamente. Además, en este mismo estudio realizaron ensayos en tablas de dimensiones comerciales, observándose que los valores de *MOR* de las probetas son superiores al obtenido en las tablas (*MOR* = 50.3) con una diferencia porcentual del 44%, esto es debido a que esta propiedad está negativamente influenciada por los defectos de las tablas.

Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2006) encontraron en probetas con 11.5% de humedad de *Eucalyptus grandis* de 26 años, realizando ensayos de flexión estática valores de *MOE* y *MOR*, de 13214 y 85.4 MPa, respectivamente. Además en este mismo estudio realizaron ensayos en tablas de dimensiones comerciales, donde los valores de *MOE* y *MOR* fueron inferiores (11588 y 40.6 respectivamente) que los de las probetas, observándose que los valores de *MOR* de las tablas son 85.6% inferior debido a que esta propiedad está altamente influenciada por los defectos de las tablas, siendo

además el *MOE* de probetas un 14% superior al obtenido en las tablas por lo que en este caso esta propiedad está influenciada por las propiedades de la madera.

En Uruguay, y en otros países, se han realizado distintos estudios sobre la influencia del raleo en las propiedades de la madera, en los que se observa a continuación que, en mayor medida, no hay diferencias significativas entre ambos (Berger, 2000, Lima, 2005, Cueto, 2012, Gendvilas et al., 2021, Díaz et al., 2012).

Cueto (2012), en un trabajo de *Eucalyptus grandis* de 19 años en Tacuarembó, al cual se le realizaron tres tratamientos de raleo fuerte— (272 árboles/ha remanentes.), medio (352 árboles/ha remanentes). y tratamiento testigo (1280 árboles/ha)—, no encontraron diferencias significativas entre tratamientos con respecto a *MOE* y *MOR*. El autor concluyó que los raleos realizados no influyeron sobre las propiedades mecánicas ensayadas.

En un estudio de Gendvilas et al. (2021) realizado en tres plantaciones de *Eucalyptus nitens* en tres sitios de Australia (Urana, Florentine y Gads) establecidas con una población de 1100 árboles/ha en 1990, a la cual se le aplicaron cuatro tratamientos de raleo —sin raleo (testigo), comercial (300 árboles/ha), comercial (500 árboles/ha) a la edad de 8 o 9 años; y no comercial de 300 árboles/ha a los 4 o 5 años—, se pudo observar que el raleo de los tres rodales no tuvo efectos significativos en la rigidez de la madera (*MOE*) y estos efectos se mantuvieron estables en todos los sitios.

Lima (2005) verifica que tres intensidades de raleo (37, 50 y 75 %) no tuvieron influencia significativa en la variable de *MOE* de *E. grandis* de 21 años de edad.

Berger (2000) estudió el efecto del espaciamiento de plantaciones de un clon de *E. saligna* (3 x 2 m, 3 x 3 m e 3 x 4 m con 6, 9 y 12 m², respectivamente), a los 10 años de edad sobre la densidad básica, módulo de elasticidad *MOE* y *MOR*). El autor encontró que los espaciamientos más amplios influyeron significativamente en la densidad básica, *MOE* y *MOR*, proporcionando un aumento significativo en estas propiedades.

2.4 CORRELACION ENTRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECÁNICAS

García y Tarigo (2006) encontraron valores de correlación aceptables entre la densidad básica y el módulo elástico, siendo de gran significancia porque en base a esto se pueden estimar valores de una variable en base a otra. Esto coincide con lo encontrado por Olivera y Cárdenas (2007), quienes encontraron alta correlación de la densidad corriente con el *MOE* medido por métodos destructivos y no destructivos, además de altas correlaciones entre *MOE* y *MOR*.

Pérez del Castillo (2001) encontró para probetas libres de defectos de *Eucalyptus grandis* bajo flexión estática correlaciones entre densidad básica y el *MOE* con un coeficiente de correlación (*r*) de 0.624, y un *r* de 0.825 entre densidad y *MOR*, un *r* de 0.895 entre *MOE* y *MOR*. Este mismo autor analizó las correlaciones existentes en compresión paralela a las fibras, donde para la densidad y *MOR* encontró un *r* de 0.811.

El *MOE* es uno de los parámetros más utilizados para estimar la resistencia de la madera, y contiene una gran correlación con la flexión estática o módulo de ruptura en flexión (*MOR*) (Pérez del Castillo et al., 2000).

Olaso (2002) encontró que el *MOE* y la densidad, aumentan con la altura del árbol. Además, observó que en los ensayos de pequeñas tablas hubo un *r* de 0.696 entre *MOE* y densidad.

Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2004, 2005, 2006) determinaron para *MOE* y *MOR* en pequeñas probetas intervalos de correlaciones de 0.60 - 0.71, y al relacionar la densidad aparente corriente encontraron rangos de 0.53 - 0.61, y de 0.72- 0.81, con el *MOE* y *MOR* respectivamente.

Todos estos estudios fueron desarrollados sobre plantaciones de Uruguay.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo fue instalado por el Programa Forestal de INIA en una plantación de *Eucalyptus grandis* en la empresa LUMIN. Está ubicado en la localidad Buena Unión, Rivera, a 1320 metros de la ruta nacional 5 (Brigadier Fructuoso Rivera), en las coordenadas 31°15' 30" S 55° 40' 44" W en suelos de grupo CONEAT 7.31.

La plantación se realizó en diciembre del año 2000 y la instalación del ensayo fue en marzo de 2002 cuando se realizó el primer raleo. Posteriormente en el año 2008 se efectuó el segundo raleo. Al momento de la instalación el ensayo presentaba valores de *DAP* de 7.4 cm y 7.3 m de *Altura*.

El ensayo tiene un diseño experimental que consiste en bloques completos al azar, compuesto por varias combinaciones de intensidad de raleo con tres repeticiones (Cuadro Nro. 1). Las parcelas ocupan 960m² y se componen de 8 filas y 12 plantas cada una.

Cuadro Nro. 1. Descripción de los tratamientos del ensayo.

Tratamiento	Primer raleo		Segundo raleo	
	Intensidad	Árb./ha remanentes	Intensidad	Árb./ha remanentes
1	Fuerte	400	Fuerte	100
2	Fuerte	400	Moderada	150
3	Fuerte	400	Baja	200
4	Moderada	550	Fuerte	200
5	Moderada	550	Moderada	250
6	Moderada	550	Baja	300
7	Baja	700	Fuerte	300
8	Baja	700	Moderada	350
9	Baja	700	Baja	400
10	Testigo	847	Testigo	847

El raleo fue por lo bajo tratando de preservar la distribución de los árboles dentro de la parcela. El primer raleo fue a desecho, donde se eliminaron árboles que estuvieran defectuosos o suprimidos, mientras que el segundo raleo fue comercial, con el cual se lograron densidades finales de 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 por dos combinaciones de primer y segundo raleo diferentes.

En los años 2002, 2005, 2007, 2008, 2009, 2011, 2015, 2018 y 2019 el equipo de INIA midió la *Ht* (m) y el *DAP* (cm) de todos los árboles de la parcela de todos los tratamientos.

En base al ensayo establecido y los objetivos propuestos, el presente trabajo se dividió en tres etapas:

1) Medición, cálculo de variables de rodal y muestreo del ensayo. Las variables de crecimiento evaluadas fueron: altura total (*Ht*), diámetro a la altura del pecho (*DAP*), Volumen individual (*Vi*), volumen por hectárea (*Vha*) total y comercial.

2) Medición de las propiedades físicas y mecánicas: densidad aparente básica (*Dab*) densidad aparente corriente (*Dac*), Modulo de elasticidad de compresión (*MOEc*), Modulo de elasticidad de flexión (*MOEf*), Modulo de rotura de flexión (*MORf*) y módulo de rotura de compresión (*MORc*). Las propiedades físicas fueron determinadas en laboratorios de INIA, mientras que las mecánicas fueron determinadas en el laboratorio del CUT (Centro Universitario Tacuarembó)

3) Análisis comparativo de crecimiento y propiedades físicas y mecánicas.

Estas etapas se explicarán en detalle a continuación.

3.2 MEDICIONES DE CRECIMIENTO, CALCULO DE VARIABLES DE RODAL Y MUESTREO

3.2.1 Crecimiento y variables de rodal

Durante el presente trabajo se realizó una medición en el año 2021, de *DAP* y *Ht* de todos los árboles del ensayo. Para todas las mediciones se utilizaron un hipsómetro (Marca Vertex) y una cinta diamétrica, respectivamente.

El *Vi* al segundo raleo fue calculado de acuerdo con la ecuación 1:

$$Vi = Ht * area\ basal * 0.41 \quad 1$$

El *Vi* con los árboles muestreados a la edad de 20.8 años fue estimado árbol a árbol mediante la ecuación 2 (Rachid et al., 2014):

$$Vi = 0.00003242 * (DAP^{1.804}) * (Ht^{1.178}) \quad 2$$

El cálculo de Vha se obtuvo con la suma del valor de V_i de cada árbol obteniendo el volumen por parcela, y llevándolo posteriormente a la hectárea utilizando la superficie de la parcela y $1000m^2$ que corresponden a una hectárea (ecuación 3).

$$Vha \left(\frac{m^3}{ha} \right) = \frac{Vi \text{ parcela} * 10000}{960 m^2} \quad 3$$

Con los datos de crecimiento al momento del segundo raleo (2008), y los datos a la edad de 20.8 años (2021) utilizando el programa de Sistema de Apoyo a la Gestión (SAG – INIA), se realizó una simulación de trozado y rendimiento para dos categorías según su uso: aserrado y pulpa, según los distintos esquemas de raleo. Se tomó un criterio de diámetro mínimo para cada categoría, siendo 25 cm para aserrado y 6 cm para pulpa. Los valores de largo de troza utilizados fueron de 5.30 m. Con esta simulación se calcularon los volúmenes comerciales (m^3/ha) para ambas categorías.

3.2.2 Muestreo

Para evaluar el efecto de los diferentes regímenes raleo sobre la densidad aparente básica de la madera (Dab , g/cm^3), densidad aparente corriente (Dac , gr/cm^3), módulo de elasticidad (MOE , MPa) y módulo de rotura (MOR , MPa), tanto para flexión como para compresión, se seleccionaron tres tratamientos contrastantes: Tratamiento 1 (100 árboles remanentes/ha), Tratamiento 5 (250 árboles remanentes/ha) y Tratamiento 9 (400 árboles remanentes/ha).

De dichos tratamientos, se seleccionaron 4 individuos que fueran representativos de cada parcela. Para ello en base a los datos de la última medición, se realizaron clases diamétricas en cada parcela, y se seleccionó el árbol de la clase diamétrica con mayor DAP , el de menor, y dos árboles promedio.

A los árboles seleccionados en campo se les señaló la dirección norte y sur, y luego fueron apeados utilizando motosierra. Una vez en el piso de cada árbol se retiraron discos a las alturas de 3.30m, 5.30m y 7.30m, a los cuales se los dividió en cuartos, seleccionando los opuestos para ser llevados a laboratorio (Figuras Nro. 1 y 2). También fueron llevadas a las instalaciones de INIA las trozas de los siguientes intervalos: 2.30m a 3.30m (Troza 1) y de 4.30m a 5.30m (Troza 2) de cada árbol seleccionado (Figura Nro. 3).

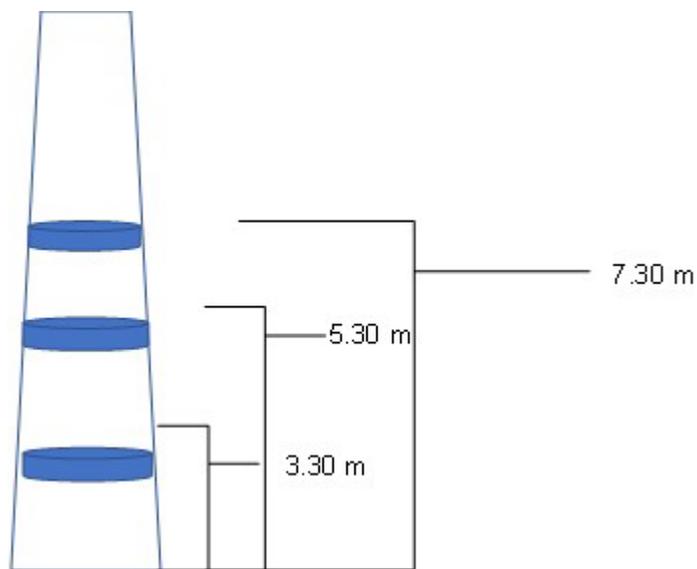


Figura Nro. 1. Representación esquemática de los discos extraídos.



Figura Nro. 2. Extracción de discos para determinación de densidad básica de la madera.



Figura Nro. 3. Trozado del fuste para extracción de muestras para propiedades de la madera.

3.3 MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

3.3.1 Preparación y acondicionamiento de probetas

Las trozas que fueron retiradas del campo fueron aserradas en el aserradero móvil WoodMizer LT – 28 (Figura Nro. 4). Las tablas obtenidas de cada troza y de cada árbol fueron aserradas utilizando sierra circular de mesa y escuadradas a 90° con una sierra sensitiva (Figura Nro. 5). De cada tabla se obtuvieron dos probetas corroborando previamente que las mismas fueran sin nudos, ni defectos visibles y con una orientación tangencial en las dos caras opuestas de las probetas.



Figura Nro. 4. Vista del aserradero móvil marca WoodMizer, modelo LT – 28.



Figura Nro. 5. Vista de Sierra circular de mesa (izquierda) y Sierra sensitiva (Derecha) para confección de probetas

De esta forma se obtuvieron dos probetas de las trozas 1 y 2 de cada árbol en las orientaciones norte y sur (Figura Nro. 6). Para esto se respetaron las dimensiones correspondientes a la norma ASTM D 143-94 (2.5 x 2.5 x 10cm, para ensayo a compresión, y 2.5 x 2.5 x 40cm, para ensayo a flexión).

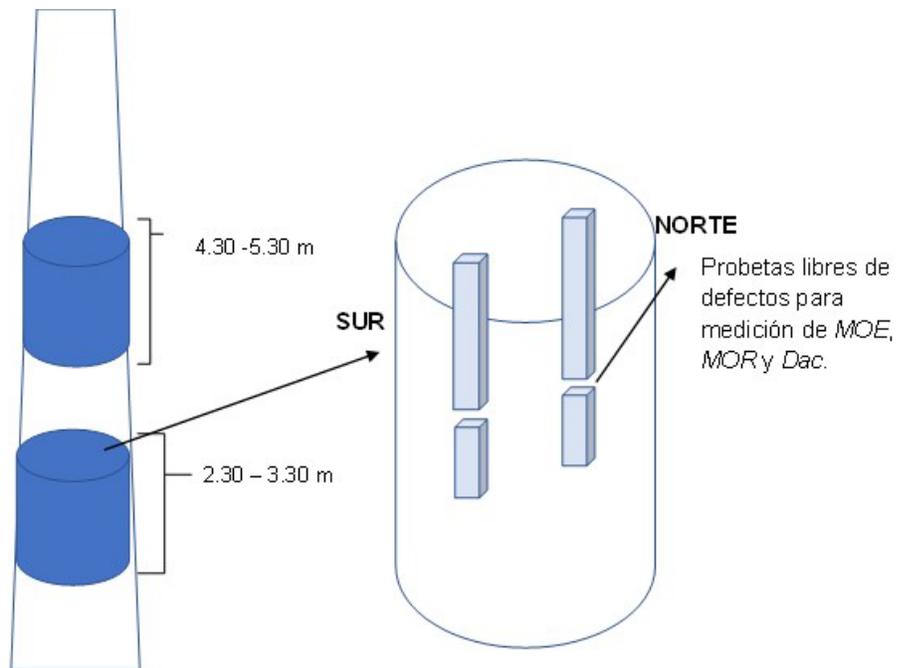


Figura Nro. 6. Representación esquemática de las trozas extraídas para la confección de las probetas libres de defectos.

Posteriormente las probetas fueron acondicionadas en la cámara de climatización Thermo Scientific (Figura Nro. 7), modelo 3949, a 20 °C y 65 % de humedad relativa, por aproximadamente 20 días, alcanzando una humedad de equilibrio del 11% en todas las probetas



Figura Nro. 7. Cámara de climatización para acondicionamiento de probetas.

3.3.2 Densidad aparente básica

Los cuartos opuestos de los tres discos extraídos por árbol en el campo fueron saturados en agua por aproximadamente siete días (Figura Nro. 8). Luego de transcurrido este periodo de tiempo, se les midió el volumen mediante inmersión en agua, obteniendo el volumen verde (Figura Nro. 9). Luego de que estuvieran a temperatura ambiente por tres días, fueron colocados en un horno de secado a 105 °C donde permanecieron por cinco días aproximadamente (Figura Nro. 10), y se los comenzó a pesar periódicamente hasta que llegaron a un peso constante.



Figura Nro. 8. Saturación de discos en agua para determinación de densidad básica de la madera.



Figura Nro. 9. Medición de volumen de discos para determinación de densidad básica.



Figura Nro. 10. Estufa para secado de discos a 105° para determinación de densidad básica.

Una vez obtenido el volumen verde y peso seco de todos los discos, se calculó la Dab (g, cm^3) de acuerdo con la norma UNIT- ISO 237:2008, mediante la ecuación 4:

$$Dab = \frac{\text{Peso anhidro (g)}}{\text{Volumen verde (cm}^3\text{)}} \quad 4$$

Para obtener la densidad aparente básica ponderada ($Dabp$) por parcela, se realizó una ponderación de la obtenida de los discos. Primeramente, se promediaron los cuartos opuestos de cada disco, y con los datos de diámetro con y sin corteza de la sección del árbol correspondiente a donde fueron retirados los discos, se calculó el área. La ecuación utilizada para obtener la $Dabp, g, cm^3$, de cada árbol fue la siguiente (ecuación 5):

$$Dabp = \frac{(A1*Db 1)+(A2*Db 2)+(A3*Db3)}{(A1+A2+A3)} \quad 5$$

Donde: A1 = área del disco 1, Db1 = densidad básica disco 1, A2 = área del disco 2, Db2 = densidad básica disco 2, A3 = área del disco 3, Db3 = densidad básica disco 3.

Posteriormente, para obtener una Dab por parcela, se promediaron las $Dabp$ de los árboles de cada parcela.

3.3.3 Densidad aparente corriente

Para la determinación de la Dac se utilizó como referencia la norma UNIT-ISO 237-2008. Cada una de las probetas tanto las de dimensiones 2.5x2.5x10cm como las de 2.5x2.5x40cm, fueron pesadas utilizando una balanza analítica (Figura Nro.11) y sus dimensiones (espesor, ancho y largo) fueron medidas con calibre (Figura Nro. 12), para calcular la Dac , g, cm^3 , mediante la ecuación 6:

$$Dac = \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Largo (cm)} \times \text{ancho (cm)} \times \text{espesor (cm)}} \quad 6$$

Posteriormente se promediaron estos valores para cada árbol, y luego se promediaron para cada parcela.



Figura Nro. 11. Vista de balanza analítica para medición de peso de probetas.

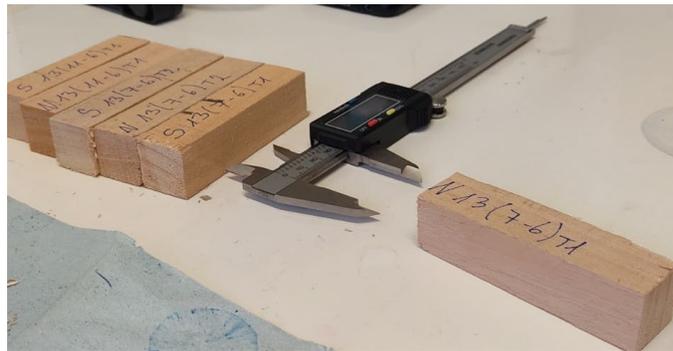


Figura Nro. 12. Vista calibre digital utilizado en la medición de las dimensiones de las probetas.

3.3.4 Resistencia a la flexión estática

Los ensayos de las propiedades mecánicas fueron realizados en el CENUR Noreste – Sede Tacuarembó, utilizando una máquina universal de ensayos Shimadzu, modelo AGS – 100 (Figura Nro. 13). La máquina cuenta con una celda de capacidad de carga máxima de 100 kN y una precisión de $\pm 0.5\%$.

El ensayo se ejecutó mediante la utilización del programa Trapezium X con el cual se definió el tipo y los parámetros de control del ensayo. Esto permitió la visualización del avance en tiempo real durante cada prueba, el almacenamiento de los resultados de cada prueba, y es posible, además, el análisis de los datos.



Figura Nro. 13. Vista Máquina universal de ensayos Shimadzu, modelo AGS – 100, para determinación de MOE y MOR.

Para la estimación de la resistencia a la flexión estática, se tomó como base el procedimiento descrito para el método primario presentado en la norma ASTM D143.

El ensayo consistió en aplicarle a las probetas apoyadas en dos puntos una carga concentrada conocida por la máquina universal, en la mitad del tramo (Figura Nro. 14). Siguiendo las especificaciones de la norma, la carga fue aplicada en la cara más cercana a la médula. La separación entre soportes fue de 360mm, y la velocidad de aplicación fue fijada en 3.5 mm/min. Además, previo

al inicio de cada ensayo se le aplicó a la probeta una carga de aproximadamente 22N en el centro de la probeta, a modo de su acondicionamiento respecto a los apoyos.

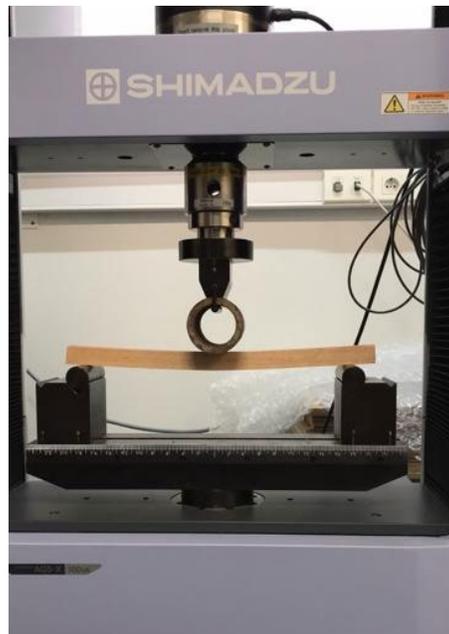


Figura Nro. 14. Vista de medición de resistencia a la flexión estática de las probetas.

A partir de los resultados obtenidos, se calcularon el $MOEf$ y $MORf$ (ecuación 7 y 8)

$$MOEf = \frac{\Delta PL^3}{48\Delta dI} \quad 7$$

Donde:

Donde: $MOEf$ = módulo de elasticidad a flexión (MPa), ΔP = diferencia de carga entre dos puntos de la zona elástica (N), L = separación entre soportes (mm), Δd = diferencia entre deformaciones (mm), I = momento de inercia (mm)

Para la estimación de *MOEf*, se consideró una zona elástica de 10 – 40 % de la carga máxima. A partir de este intervalo fueron definidos ΔP y Δd .

$$MORf = \frac{3PL}{2bh^2} \quad 8$$

Donde: *MORf* = módulo de rotura a flexión (MPa), P = carga máxima aplicada (N), L = Separación entre soportes (mm), b = ancho de la probeta (mm), h = altura de la probeta (mm).

Las ecuaciones presentadas tanto de *MOEf* como de *MORf* fueron basadas en la norma UNIT-ISO 1137:2007.

3.3.5 Resistencia a la compresión paralela a la fibra.

Para la estimación de esta propiedad también fue tomada como referencia la norma ASTM D 143, según la cual las dimensiones requeridas de las probetas fueron 25x25x100mm, realizando el ensayo con una velocidad de prueba de 0.3mm/min (Figura Nro. 15). Además, para poder asegurar que la carga aplicada sea de compresión y minimizar los componentes de flexión, los cuales disminuyen la resistencia de la madera, las caras de las probetas deben ser paralelas entre sí y perpendiculares al eje.

Siguiendo la guía de la norma, para poder reducir la posibilidad de ocurrencia de fallas de rodaje por los extremos (exceso de contenido de humedad en los extremos), previo a la realización de los ensayos los extremos de las probetas fueron secados con aire caliente (secador de pelo) durante cinco minutos (Figura Nro. 15).



Figura Nro. 15. Vista de medición resistencia a la compresión paralela a la fibra.

Al realizar los ensayos el programa da como resultado un gráfico de esfuerzo por deformación, a partir del cual se calcula el MOR_c (ecuación 9):

$$MOR_c = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad 9$$

Donde: MOR_c = Modulo de rotura de compresión, $P_{m\acute{a}x}$ = Fuerza máxima aplicada, A_0 = Sección transversal de la probeta

La deformación (ϵ), se calcula en función del desplazamiento d de la probeta y la longitud inicial L_0 , ambas medidas en mm. (ecuación 10):

$$\epsilon = \frac{d}{L_0} \quad 10$$

3.3.6 Contenido de humedad

De las 153 probetas con dimensiones de 2.5 x 2.5 x 10 cm, las cuales fueron pesadas inicialmente, se seleccionaron 63 para determinarles el contenido de humedad. Para esto se las colocaron en una estufa a 105 °C y luego a los siete días se almacenaron en un desecador para alcanzar una condición de equilibrio (Figura Nro. 16) e impedir la absorción de la humedad del ambiente. Posteriormente, fueron pesadas nuevamente hasta alcanzar peso constante y así obtener la masa seca. Utilizando la siguiente ecuación se calculó el contenido de humedad en base seca (H_s) (ecuación 11):

$$H_s (\%) = \frac{\text{Peso húmedo (g)} - \text{Peso seco (g)}}{\text{Peso seco (g)}} \quad 11$$

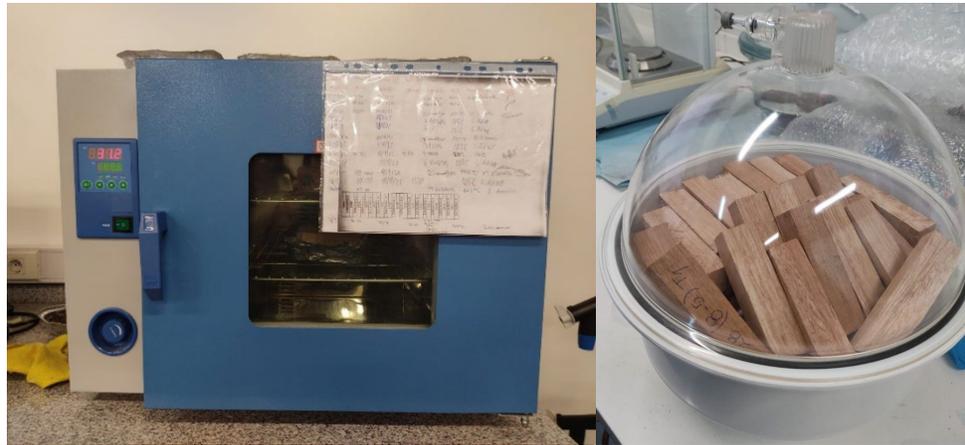


Figura Nro. 16. Izquierda: Estufa de secado de probetas para determinación de contenido de humedad. Derecha: Vista de desecador para minimizar absorción de humedad del ambiente de las probetas.

Esta determinación se realizó para confirmar que los ensayos de *MOE* y *MOR* se realizaron con un contenido de humedad próximos al 12% de acuerdo a lo especificado por la norma ASTM D143.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO

A partir de las mediciones de crecimiento realizadas en 2021, y con los antecedentes de mediciones anteriores se analizaron las evoluciones de las distintas variables dasométricas (*DAP*, *Ht*, *Vi* y *Vha*) a lo largo de todos los años.

Para detectar si los distintos esquemas de raleo tenían efecto en las variables analizadas, se realizó un análisis de varianza de las variables relacionadas al crecimiento y producción (*DAP*, *Ht*, *Vi*, *Vha*, *Vha raleo*, y *Vha total*) y a las propiedades de la madera (*Dab*, *Dabp*, *MOEf*, *MOEc*, *MORf* y *MORc*).

El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el software Statistical Analysis Systema ® (SAS), considerando un nivel mínimo de significancia del 5%. Se realizaron análisis de varianza, pruebas de diferencias de medias y correlaciones, para evaluar la hipótesis bajo estudio.

Para todas las variables, primeramente, fueron verificados el cumplimiento de los supuestos de Normalidad de los datos mediante el test Shapiro - Wilks, homogeneidad de varianzas el test de Levene, y se observó la distribución de errores visualmente mediante gráficos. Para las variables en las que no se cumplieron estos supuestos, se realizó test de Kruskal – Wallis (no paramétrico), y posterior comparación de medias SNK.

Luego del análisis de varianza, en el caso de existir diferencias entre los diferentes esquemas de raleo, se les realizó un test de comparación de medias, siendo el test de Tukey para las variables de propiedades de la madera y el test de Bonferroni para las variables de crecimiento. Para las variables *Dab*, *Dac*, *MOEf*, *MOEc*, *MORf* y *MORc* se estimaron los coeficientes de correlación de Pearson (*r*). Tanto para las probetas utilizadas para flexión como para compresión este coeficiente fue calculado en base a cada una de las 153

probetas. La correlación entre Dab y Dac , MOE y MOR , el coeficiente fue calculado con los promedios por árbol. Al realizar la correlación entre Dac y Dab , se promediaron los valores de Dac de las probetas utilizadas para flexión y de las utilizadas para compresión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CRECIMIENTO

4.1.1 Evolución a lo largo del ciclo

Los raleos con menor número de árboles remanentes son los que tienen un mayor valor de *DAP*, mientras que aquellos con una intensidad baja de raleo son los que tienen menores valores para esta variable. Se destaca que el testigo (847 árboles por hectárea) presenta los valores más bajos. (Figura Nro. 17). Esto es coincidente con los resultados reportados por Barrios et al. (2016) donde a medida que aumenta la edad las diferencias en *DAP* aumentan a mayor intensidad de raleo. Similar tendencia fue obtenida por Muñoz et al. (2005) donde los esquemas de raleo con menores árboles remanentes presentan un diámetro mayor que los tratamientos con raleos menos intensos o no raleados.

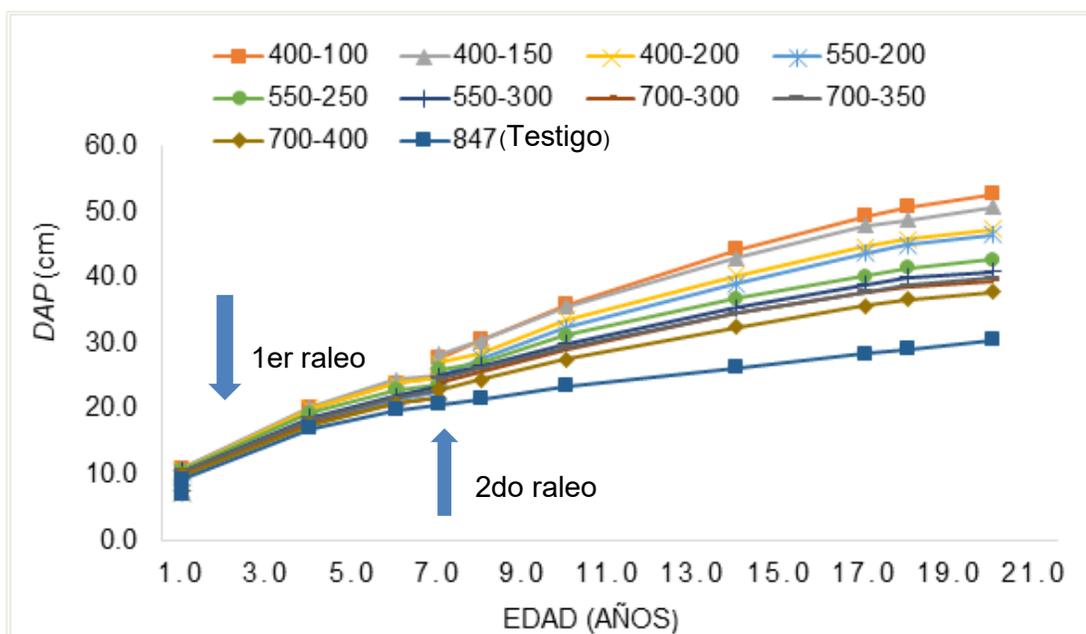


Figura Nro. 13. Evolución del *DAP* en función de la edad para cada esquema de raleo.

El testigo (847 árboles por hectárea) previo al segundo raleo presenta un *DAP* de 20.7 cm, mientras que los esquemas de menor densidad poblacional inicial (400 árboles por hectárea) alcanzan un *DAP* promedio de 24.9 cm lo cual equivale a un 17% (4 cm). Luego de transcurrido un año de la aplicación del segundo raleo en el cual se pasa de 100 a 400 árboles por hectárea, la diferencia con el testigo aumenta a un 29% (9cm). Desde ese momento hasta los 20.8 años la variable *DAP* siguió en aumento entre los esquemas de raleo extremos (100 vs 400 árboles por hectárea), llegando a un aumento del 42%. Este incremento se debe a un efecto combinado del mayor espaciamiento producto del raleo y de la eliminación de los árboles de menor tamaño. Esto ocurre porque se reduce la competencia entre los árboles, lo que le permite a los individuos remanentes aprovechar mejor el espacio y así aumentar su crecimiento en diámetro (Figura Nro. 17).

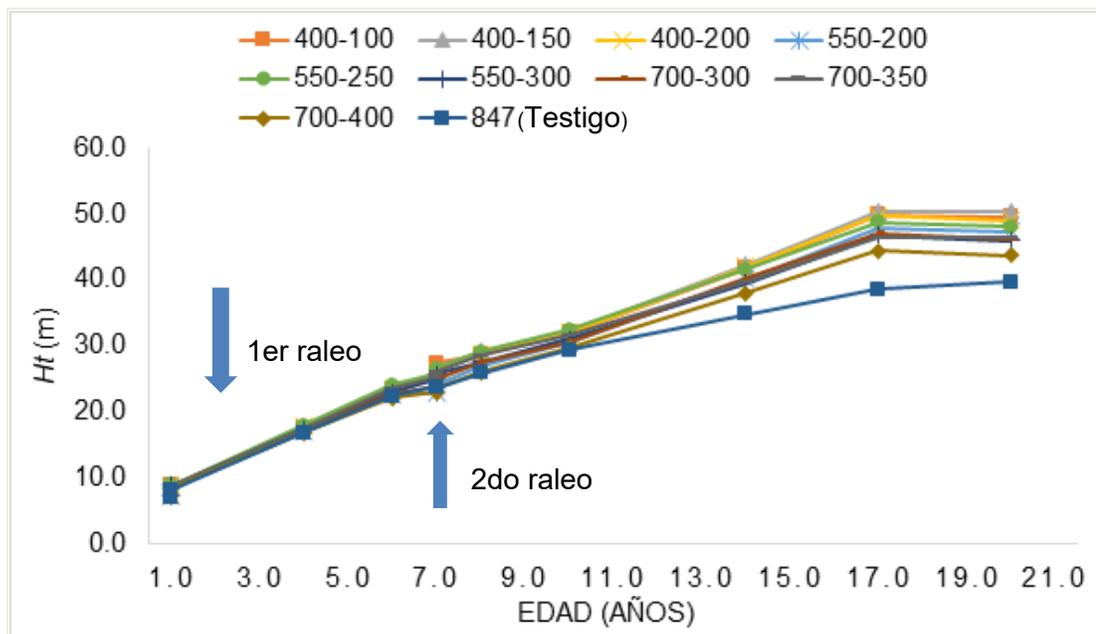


Figura Nro. 14. Evolución de la *Ht* en función de la edad para cada esquema de raleo.

De la evolución de la *Ht* se observa que previo al segundo raleo, al comparar las poblaciones extremas (847 vs 400 árboles por hectárea) donde se disminuye la población de árboles remanentes a aproximadamente la mitad, la *Ht* aumentó un 7% (2 metros). Luego de un año de realizado el segundo raleo, en las poblaciones que pasan de 100 a 400 árboles por hectárea, la diferencia de éste último con el testigo aumenta a un 10% (3 metros) Al año 20.8 se registran aumentos de un 20% (10 m) entre los tratamientos de 400 y 100 árboles por hectárea (Figura Nro. 18).

A diferencia del comportamiento que se observa con el *DAP*, con la *Ht* las diferencias entre esquemas de raleo son menos notorias debido a que la misma presenta menor respuesta a los cambios poblacionales. Por otra parte, esta variable a diferencia del *DAP* depende en mayor medida de la calidad del sitio, y no tanto por las variables de manejo (Alcorn et al., 2007, Oliveira Neto et al., 2010).

En la última evaluación se puede observar que la *Ht* no presenta variaciones importantes lo cual puede deberse a que en esta etapa del ciclo del cultivo los incrementos son de tan escasa magnitud que no son captados por la precisión de los equipos de medición. Esto determina una relativa estabilización o disminución de esta variable en el período mencionado (Figura Nro. 18).

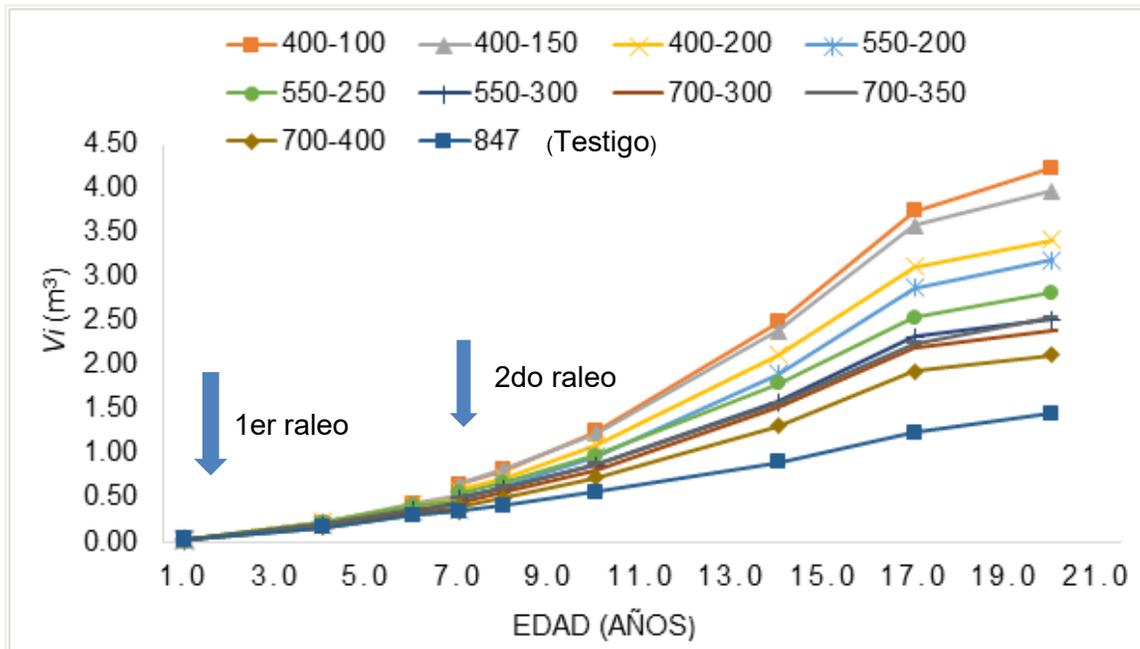


Figura Nro. 15. Evolución del V_i en función de la edad para cada esquema de raleo.

Al igual que lo que lo que ocurre en las variables descriptas anteriormente (DAP y Ht), en el rango de edades estudiadas, los mayores valores de V_i se observan en los esquemas de raleo con menores poblaciones, mostrando mayores diferencias luego del segundo raleo. La comparación entre los tratamientos extremos previo al segundo raleo (400 vs 847 árboles por hectárea) registra una diferencia de un 32% (0.16 m^3) entre los volúmenes individuales de las poblaciones extremas (400 vs 847 árboles por hectárea). Al año de realizado el segundo raleo las diferencias entre las poblaciones extremas (100 vs 847 árboles por hectárea) son de 3 m^3 , lo cual corresponde a una diferencia del 49% (0.40 m^3). A partir de este momento, se incrementan las diferencias entre estos tratamientos extremos llegando a 66% (3 m^3) (Figura Nro. 19).

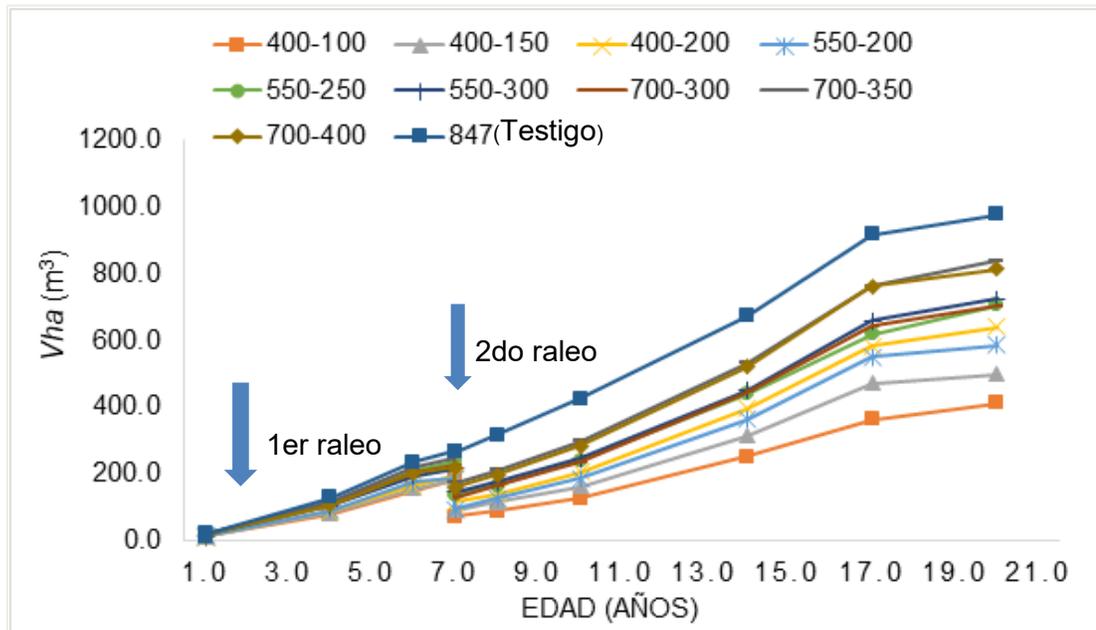


Figura Nro. 16. Evolución del *Vha* en función de la edad para cada esquema de raleo.

Los resultados del *Vha* muestran una tendencia inversa a la obtenida con las variables anteriormente descritas (*DAP*, *Ht*, *Vi*), ya que en este caso las poblaciones con mayores densidades de árboles alcanzan los valores más altos de *Vha* (Figura Nro. 20). En este caso la productividad se asocia a mayor cantidad de árboles por hectárea, por lo que los esquemas de raleo con menos árboles remanentes presentan menores valores para esta variable.

Previo al segundo raleo las poblaciones extremas (400 vs 847 árboles por hectárea) presentan una diferencia de 270% en el *Vha* a favor del testigo sin raleo, lo cual corresponde a 82 m³. Luego de transcurrido un año de la aplicación del segundo raleo dicha diferencia es de 204 m³ en las poblaciones extremas (100 vs 847 árboles por hectárea), lo que significa un 317 %. Finalmente se registran diferencias de 320% en *Vha* al año 20.8 (Figura Nro. 20).

Estos resultados concuerdan con los encontrados por Methol (1999) donde se determinó que los mayores crecimientos por hectárea se producen en poblaciones sin raleo, en comparación a tratamientos con raleo, debido a una mayor ocupación total del sitio.

4.1.2 Productividad en la edad de 21 años

Del análisis de los resultados a turno final se observa que tanto para el *DAP* como para el *Vi* la población testigo (no raleado, 847 árboles por hectárea) es la que presenta los menores valores con relación al resto de los esquemas de raleo (Cuadro Nro. 2).

Estos resultados corroboran lo que reportan varios autores respecto a que los distintos esquemas de raleo afectan las variables de crecimiento (*Ht*, *DAP* y *Volumen*) (Balloni y Simões, 1980, Cueto, 2012, Muñoz et al., 2005).

Cuadro Nro. 2. Valores promedios y error estándar (E.E.) de *DAP*, *Ht*, *Vi*, a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Bonferroni (p -valor $<0,05$).

N° árboles remanentes/ha	<i>DAP</i> (cm)	<i>Ht</i> * (m)	<i>Vi</i> (m³)
400-100	52.7 (0.3) a	49.6 (0.6) ab	4.2 (0.12) a
400-150	50.7 (0.7) ab	50.4(0.1) a	4.0 (0.14) ab
400-200	47.2 (0.4) b	48.9 (0.2) ab	3.4 (0.03) b
550-200	46.4 (1.5) bc	47.2 (0.4) b	3.2 (0.18) bc
550-250	42.7 (0.2) c	48.0 (1.0) b	2.8 (0.08) c
550-300	40.9 (0.5) cd	46 (0.5) bc	2.6 (0.04) cd
700-300	39.5 (0.7) cd	46.1 (0.4) bc	2.4 (0.12) cd
700-350	39.8 (1.0) cd	46.3 (1.1) bc	2.5 (0.14) cd
700-400	37.8 (0.5) d	43.7 (1.0) c	2.1 (0.08) d
847	30.4 (0.7) e	39.6 (0.8) c	1.5 (0.05) e

* Analizada mediante Test de Kruskal – Wallis

Los mayores valores de *DAP* y *Vi* se obtienen para los esquemas de raleo con menor población final (100 y 150 árboles por hectárea), los cuales a su vez no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí. Se registra además que los diferentes esquemas de raleo que conducen (por dos días) a 200 árboles remanentes por hectárea presentan valores de *DAP* y *Vi* estadísticamente iguales entre sí, al igual que lo que ocurre con los esquemas de raleo de 250, 300, 350 y 400 árboles por hectárea remanentes.

Las tendencias similares similitud entre *DAP* y *Vi* se debe a que el *DAP* es la variable que tiene mayor influencia en el volumen, corroborando lo que observó García et al. (2017) donde el aumento del volumen total depende del crecimiento en área basal.

El *DAP* tiende a disminuir a medida que los raleos son menos intensos, debido a que el raleo provoca un incremento de la tasa de crecimiento en diámetro. El resultado mencionado anteriormente fue consistente con otros estudios obtenidos con *E. nitens* (Díaz et al., 2012, Muñoz et al., 2005).

Con el presente estudio se confirma lo reportado por Trevisan (2006), donde para la especie *E. grandis* con 14 años de edad y con cuatro intensidades diferentes de raleo (1638, 1150; 589 y 192 árboles por hectárea), la variable *DAP* presenta una influencia significativa de las distintas intensidades de raleo. A su vez se obtuvo que, a mayor intensidad de raleo, mayores son los valores de diámetro a la altura del pecho. Estos resultados eran esperables debido a que los raleos realizados fueron por lo bajo (es decir, en cada tratamiento se eliminaron los árboles dominados de menor tamaño, favoreciendo el desarrollo de individuos de mayor tamaño), lo cual aumenta el valor del diámetro.

Cueto (2012) y Carpineti et al. (1995) afirman que el raleo aumenta el volumen de madera de los árboles remanentes, ya que reduce el número de árboles por hectárea y el crecimiento se concentra en los árboles remanentes, los cuales obtienen mayores diámetros. Los raleos permiten potenciar el crecimiento en diámetro, permitiéndoles a los árboles remanentes aprovechar el espacio disponible (Nutto y Touza, 2006).

En cuanto a la variable *Ht*, las mayores alturas se presentan en el esquema de raleo con 150 árboles remanentes, mientras que las menores alturas se encuentran para el testigo y el esquema con 400 árboles por hectárea.

Los resultados obtenidos con respecto a la altura difieren con los registrados por Díaz et al. (2012) para una plantación de *E. nitens* de 15 años, con raleos a los 7 y 9 años y poblaciones de árboles remanentes de 300,400, 500, 700 y un testigo con 1070 árboles por hectárea, en donde la altura de los tratamientos no se vio afectada por la intensidad de raleo. Resultados diferentes

(y similares a los obtenidos en este trabajo de tesis) fueron obtenidos por Trevisan (2006) que reportó diferencias significativas entre altura para las distintas intensidades de raleo en una plantación de *E. grandis* de 14 años de edad.

Barrios et al. (2016) encontraron para *E. grandis*, que los mayores valores de altura promedio se daban en parcelas con raleo, en comparación con las que no fueron raleadas.

Al contrario de lo observado con el *DAP*, la *Ht* y el *Vi* los resultados obtenidos de *Vha* muestran que el esquema de raleo que alcanzó el mayor valor fue el de 847 árboles por hectárea, el cual es estadísticamente similar al esquema de raleo con 350 árboles remanentes (Cuadro Nro. 3). Los valores obtenidos de *Vha* para los tratamientos con 250 a 300 árboles por hectárea son estadísticamente similares, y lo mismo ocurre con las poblaciones con 100 a 200 árboles por hectárea. Esto se debe a que el raleo provoca una disminución en el volumen total, en comparación a rodales sin raleo (García et al., 2017).

Cuadro Nro. 3. Valores promedio y error estándar (E.E.) para las variables *Vha*, *Vha* raleo, *Vha* total a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Kruskal - Wallis (p-valor<0,05)

Nro. árboles remanentes/ha	<i>Vha</i> a 20.8 años	<i>Vha</i> 2do. raleo*	<i>Vha</i> total*
400-100	412 (35.3) d	113 (2.1) a	525 (33.6) d
400-150	498 (35.8) cd	88 (3.2) b	586 (38.4) cd
400-200	641 (23.4) c	75 (3.3) bc	716 (26.6) c
550-200	587 (30.3) c	97 (4.4) ab	684 (34.7) c
550-250	704 (19.7) bc	103 (5.6) ab	807 (19.9) b
550-300	724 (15.2) bc	71 (5.9) bc	795 (9.6) b
700-300	703 (24.3) bc	109 (13.6) ab	812 (19.9) b
700-350	839 (41.4) ab	77 (8.5) bc	916 (34.7) a
700-400	815 (19.7) b	60(5.9) c	875 (18.2) ab
847	978 (24.0) a	-----	978 (24.0) a

* Analizada mediante Test de Kruskal - Wallis

Estos resultados concuerdan con los registrados por Trevisan (2006) para *E. grandis* donde el *Vha* disminuyó gradualmente con el aumento de las intensidades de raleo. En este estudio el esquema de raleo con mayor número

de árboles por hectárea presentó el mayor volumen, y se diferenció significativamente de los demás tratamientos.

La comparación entre las poblaciones de árboles remanentes de 100 vs 400 árboles por hectárea muestra que la población de árboles aumenta 4 veces, mientras que las variables *DAP*, *Ht* y *Vi*, disminuyen un 28%, 12% y 50%, respectivamente. Al aumentar la población 8 veces, (100 árboles remanentes finales con respecto a toda la población 847), se detecta que las variables *DAP*, *Ht* y *Vi*, disminuyen un 42%, 20% y 64%; respectivamente. Esto determina falta de proporcionalidad entre las variables (*DAP*, *Ht* y *Vi*) y la densidad poblacional, ya que duplicar la densidad poblacional no equivale a una disminución de igual magnitud de las variables.

El *Vha* obtenido en el 2^{do} raleo muestra diferencias significativas entre los diferentes esquemas de raleo. La población de 100 árboles por hectárea es la que presenta el menor valor, y difiere estadísticamente de la mayoría de los esquemas de raleo a excepción de las poblaciones de 200 (con población inicial de 550), 250 y 300 árboles por hectárea (con población inicial de 700). Se registra, además, que la población de 400 árboles por hectárea es diferente estadísticamente de las poblaciones de 100, 150, y 250 árboles por hectárea.

En cuanto al *Vha* total se detecta que existen diferencias significativas entre los diferentes esquemas de raleo. La población que obtuvo el menor valor de productividad fue la de 100 árboles por hectárea y se diferenció estadísticamente de las poblaciones de 200 a 847 árboles por hectárea. Sin embargo, el testigo fue quien presentó los mayores valores en cuanto a *Vha* total, y se diferenció estadísticamente de la mayoría de los esquemas de raleo, a excepción de aquellos con poblaciones de 250 y 400 árboles por hectárea.

El grupo de 350 a 847 árboles por hectárea no presenta diferencias significativas entre sí. Estos resultados difieren con los obtenidos por Cueto

(2012), el cual en un estudio de *E. grandis* de 19 años no encontró diferencias significativas entre los tratamientos para la variable *Vha* total. De acuerdo con este autor es factible obtener individuos de grandes diámetros sin disminuir la productividad por hectárea, aspecto que no fue confirmado en este estudio.

La comparación entre poblaciones con 100 y 400 árboles por hectárea (donde la población aumentó 4 veces) indica que el *Vha* a los 20.8 años y *Vha* totales aumentaron un 40%. Sin embargo, el *Vha* de la madera extraída en raleo al comparar los tratamientos extremos en el momento de raleo (400 y 700 árboles por hectárea) disminuyó un 47%. Por otro lado, la comparación entre 100 y 847 árboles por hectárea (en donde la población aumenta 8 veces) muestra que con las variables *Vha* a los 20.8 años y *Vha* total ocurre un incremento de un 48% y 46%, respectivamente.

4.1.3 Estimación de trozado a la edad de 7 y 21 años mediante el Sistema de Apoyo a la Gestión – SAG grandis

Los resultados obtenidos con el simulador muestran que, al momento del segundo raleo, las dimensiones de los fustes (pequeños diámetros) fueron adecuados únicamente con destino a celulosa (100%) (Cuadro Nro. 4). El mayor valor se da en el esquema de raleo de 700-300 árboles por hectárea, debido a que se realiza la mayor extracción (400 árboles por hectárea) de árboles en comparación con las otras poblaciones.

Cuadro Nro. 4. Resultados de volumen comercial obtenidos con el simulador de trozado SAG grandis.

Esquema de raleo (nro. de arb. remanentes/ha)	Volumen/ha a la edad de 7.3 años (m ³)			Volumen/ha a la edad de 20.8 (m ³)			Total (m ³)		
	Aserrado	Celulosa	Total	Aserrado	Celulosa	Total	Aserrado	Celulosa	Total
	400-100	-	110 (100%)	110	310 (88%)	43 (12%)	353	310 (67%)	153 (33%)
400-150	-	87 (100%)	87	368 (86%)	59 (14%)	427	368 (72%)	146 (28%)	513
400-200	-	72 (100%)	72	436 (83%)	91 (17%)	527	436 (73%)	163 (27%)	609
550-200	-	90 (100%)	90	414 (82%)	93 (18%)	507	414 (69%)	183 (31%)	597
550-250	-	94 (100%)	94	432 (76%)	135 (24%)	567	432 (65%)	229 (35%)	661
550-300	-	71 (100%)	71	439 (72%)	167 (28%)	606	439 (65%)	238 (35%)	677
700-300	-	120 (100 %)	120	386 (69%)	175 (31%)	561	386 (58%)	277 (42%)	663
700-350	-	72 (100%)	72	469 (71%)	196 (29%)	665	469 (64%)	268 (36%)	737
700-400	-	56 (100%)	56	457 (66%)	239 (34%)	696	457 (61%)	295 (39%)	752
850-710	-	-	.	373 (47%)	413 (53%)	786	373 (47%)	413 (53%)	786

En cuanto al volumen extraído en a la edad de 20.8 años se obtiene que los esquemas de raleo de 100 hasta los de 300 árboles por hectárea fueron los que obtuvieron mayores porcentajes aserrables (88 a 72 %, respectivamente), los cuales disminuyen en las demás poblaciones. Se registran mayores porcentajes para aserrado, ya que hay mayor proporción de grandes diámetros. Si el objetivo de producción es obtener mayores diámetros y asumiendo mayores precios por este tipo de productos lo ideal es realizar plantaciones con poblaciones finales entre 100 y 300 árboles por hectárea. Se debe tener en cuenta que la madera para aserrado tiene un alto valor además de relativos bajos costos de transporte a las plantas de transformación de la zona norte del país mientras que la madera con destino celulósico se encuentra en el escenario opuesto.

El volumen extraído a la edad de 20.8 años para celulosa tiene un comportamiento contrario al de volumen aserrable, ya que los mayores porcentajes de madera para celulosa se dan en las poblaciones con mayores arboles por hectárea (300 – 710 árboles por hectárea).

Los volúmenes totales más altos de madera fueron obtenidos por esquemas de raleo con las poblaciones que van de 300 a 710 árboles por hectárea. Las poblaciones de 100 a 200 árboles por hectárea obtienen los mayores porcentajes aserrables. Ocurre lo mismo que a la edad de 20.8 años en el sentido que los mayores porcentajes aserrables se registran en las poblaciones con menores árboles por hectárea, y a su vez los mayores porcentajes celulósicos se detectan en las poblaciones con mayores árboles por hectárea. Si el objetivo es tener un mayor volumen total se debería optar por poblaciones de 250 a 300 árboles por hectárea con los cuales se obtienen altos porcentajes aserrables.

Dependiendo del precio de comercialización en función del diámetro, puede resultar de mayor interés producir diámetros mayores o mayor producción de madera. Si el precio se diferencia por diámetro resultaría de interés, producir los mayores diámetros posibles lo cual se obtiene con bajas cantidades de árboles remanentes.

4.2 PROPIEDADES DE LA MADERA

4.2.1 Densidad aparente básica y densidad aparente corriente

El análisis de los datos muestra que existen diferencias significativas entre los esquemas de raleo, tanto para la *Dab* como para la *Dac* (Figuras Nro. 21 y 22).

Para la *Dabp*, se registra que la población con 100 árboles por hectárea es la que presentó el mayor valor promedio (0.443 g/cm^3), y fue significativamente diferente de la población con 400 árboles por hectárea, las cuales, a su vez, no difieren del raleo intermedio (250 árboles por hectárea). Los resultados obtenidos para la *Dabp* muestran que el esquema de raleo de 700 – 400 árboles por hectárea tiene la mayor variabilidad, a diferencia de la población de 550- 250 árboles por hectárea que registra la menor variabilidad (Figura Nro. 21).

De igual forma, Trevisan (2006) evaluando madera de *E. grandis* de 14 años de edad observó diferencias significativas entre los distintos esquemas de raleo (1638, 1150, 589, 192 árboles por hectárea) registrando el mayor valor de *Dabp* en los esquemas de raleo con menor número de árboles remanentes por hectárea. Este autor concluye que existe una influencia de las intensidades de raleo en esta propiedad, a diferencia de los estudios que realizaron Lima y García (2010) y Trevisan et al. (2012) en plantaciones de *E. grandis* de 21 y 18 años,

respectivamente, donde la densidad básica no fue influenciada por las diferentes intensidades de raleo realizadas.

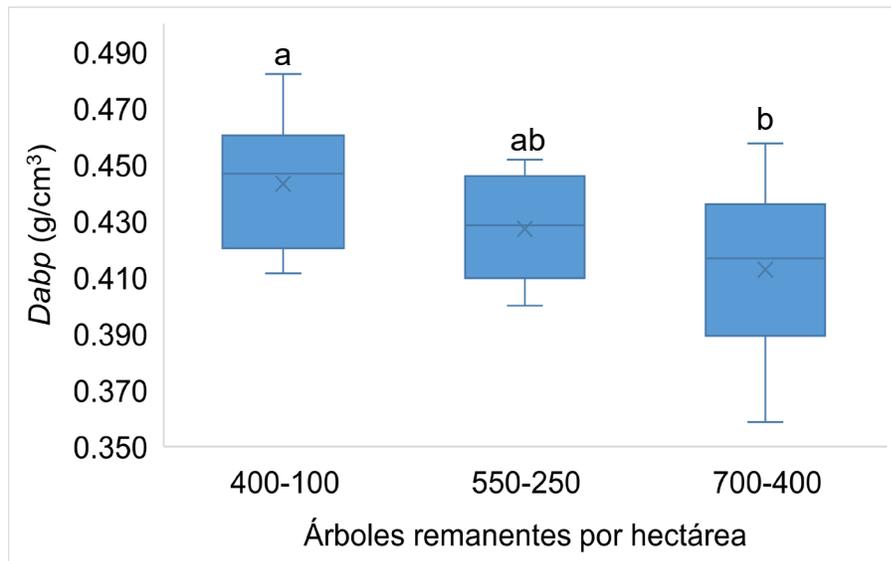


Figura Nro. 17. Valores promedios de *Dabp* a la edad de 20.8 años para diferentes esquemas de raleo. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Tukey, (p -valor <0.05).

Berger (2000) registró que la densidad básica de *E. saligna* de 10.5 años estaba influenciada significativamente por las distintas densidades de población, es decir que, al aumentar la intensidad de raleo también se observaron aumentos de la *Dab*. Lima y García (2005) observaron tendencias similares en una plantación de *E. grandis* de 18 años donde uno de los tratamientos de mayor intensidad de raleo obtuvo valores estadísticamente más altos de *Dab*.

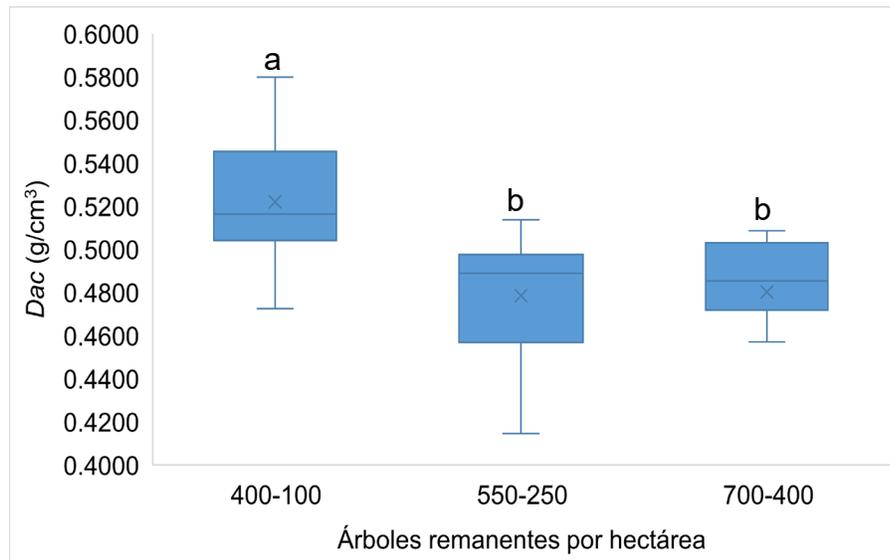


Figura Nro. 18. Valores promedios de *Dac* a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo con el test de Tukey, (p -valor <0.05).

Con respecto a la *Dac* se detecta que el raleo tiene una influencia significativa sobre esta variable, donde un mayor espaciamiento (raleo más intenso) proporcionó árboles con mayor valor de densidad respecto a raleos intermedios y/o bajos. Se registra que la menor variabilidad la presenta la población con 400 árboles por hectárea, observándose además que las poblaciones de 100 y 250 árboles por hectárea se asemejan en cuanto a su variabilidad (Figura Nro. 22). Estos resultados eran los esperados y pueden estar explicados porque en las poblaciones de menor densidad de árboles se produce madera adulta antes, en comparación con poblaciones de mayor densidad Malan y Hoon (1992). Además, según Carrillo et al. (2015) la madera adulta de los eucaliptos contiene fibras más grandes y paredes más gruesas, características que están relacionadas con el aumento de densidad básica.

4.2.2 Resistencia a la flexión estática y resistencia a la compresión paralela a la fibra

El análisis de las resistencias mecánicas de la madera muestra que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de raleo para las propiedades mecánicas (Figuras Nro. 23, 24, 25 y 26).

Los resultados obtenidos muestran una tendencia de aumento tanto del *MOEf* y *MOEc* como del *MORf* y *MORc* al aumentar la intensidad de raleo, pero no es confirmado estadísticamente. Para la propiedad *MOEf* se registra la mayor variabilidad de los datos en la población con menor intensidad de raleo (400 árboles por hectárea), al contrario de lo que ocurre en *MORf* donde la menor variabilidad se obtiene con la mayor intensidad de raleo (100 árboles por hectárea remanentes). Sin embargo, el *MORc* presenta el mismo comportamiento que *MOEf*, debido a que su mayor variabilidad se da en las poblaciones con 400 árboles por hectárea, mientras que el *MOEc* presenta un comportamiento diferencial a los anteriormente descritos ya que la mayor variabilidad se presenta en las poblaciones con 250 árboles por hectárea.

Los valores obtenidos en este ensayo de *MOEf* son una aproximación a los valores de referencia de 12000MPa de la norma UNIT 1262 utilizados como criterio de clasificación de madera aserrada de uso estructural.

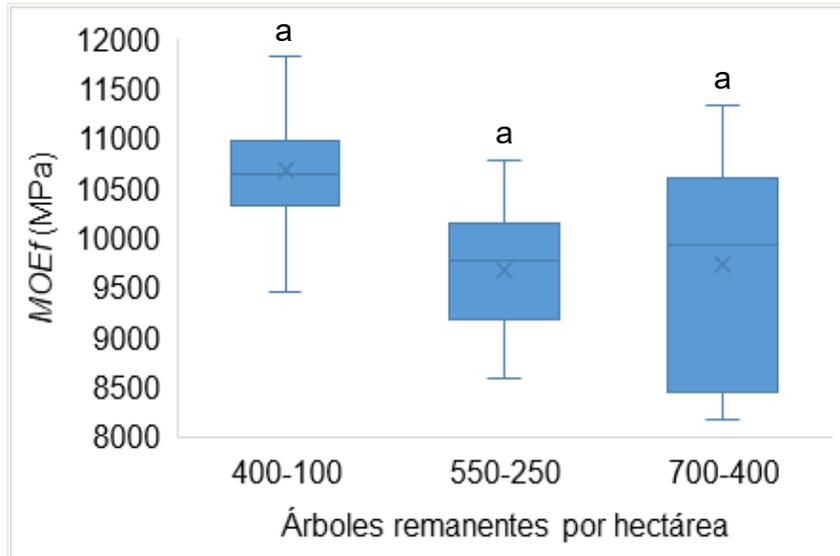


Figura Nro. 19. Valores medios de *MOEf* a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p-valor 0.05.

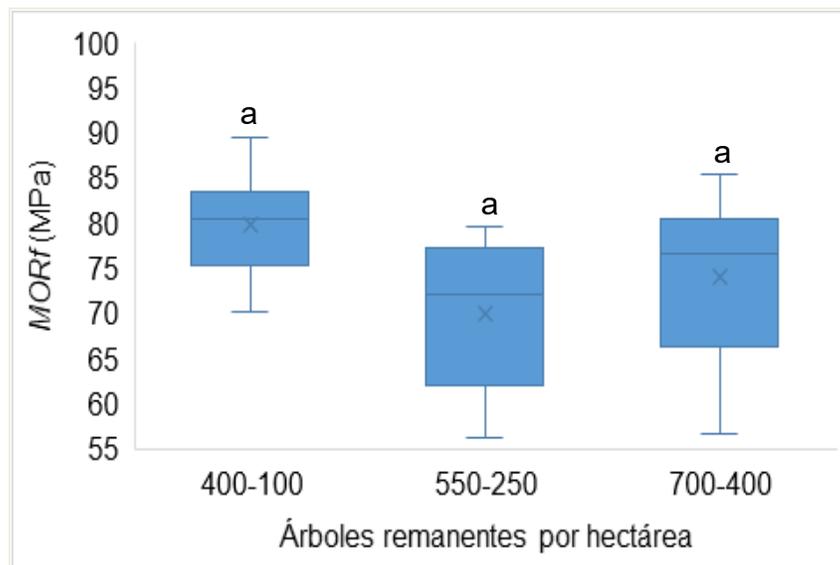


Figura Nro. 20. Valores medios de *MORf* a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p-valor 0.05.

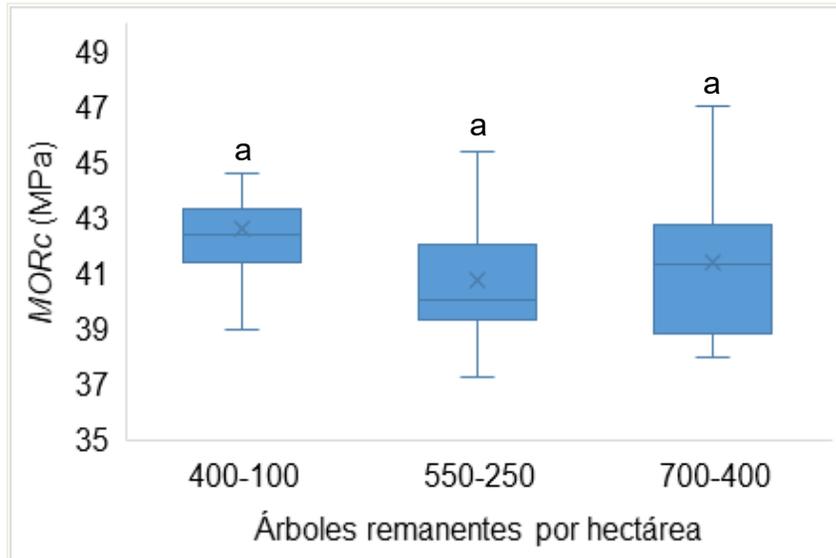


Figura Nro. 21. Valores medios de *MORc* a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p-valor 0.05.

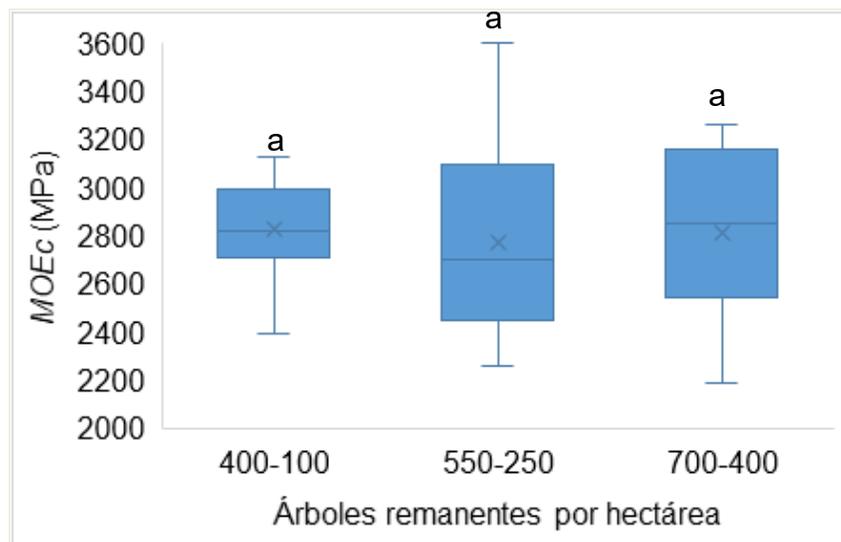


Figura Nro. 22. Valores medios de *MOEc* a la edad de 20.8 años. Las letras distintas indican diferencias entre esquemas de raleo de acuerdo a Tukey, con p-valor 0.05.

Estos resultados concuerdan con un estudio similar realizado por Cueto (2012) donde se evaluó una plantación de *Eucalyptus grandis* de 20 años, a la cual se le realizó un raleo a los 5 años y densidades finales de 272 y 352 árboles por hectárea además de un testigo con 1280 árboles por hectárea. Este autor determinó que las diferencias entre los tratamientos no eran significativas para *MOE* y *MOR* de flexión.

Resultados similares fueron encontrados por Lima (2005) en una plantación de *E. grandis* con 21 años de edad, donde no se detectaron diferencias significativas en el módulo de elasticidad de la madera entre los raleos con poblaciones finales de 549 y 535, realizados a los 8,5 años.

Berger et al. (2002) encontraron diferencias significativas entre las distintas densidades de plantación y las propiedades de la madera (*MOR* y *MOR*) con *Eucalyptus saligna* de 10.5 años. Este autor determinó valores de *MOE* y *MOR* mayores en espaciamientos de 12m² (9780 y 75 MPa respectivamente), en comparación con espaciamientos menores de 9 m² (9335 y 70 MPa, respectivamente) y 6 m² (9264, y 68, 35 MPa, respectivamente). Sin embargo, Gendvilas et al. (2021) no obtuvieron diferencias significativas de *MOE* medido a través de un método no destructivo entre raleos en *E.nitens* de 19 – 21 evaluando raleos de 300, 500 árboles por hectárea y un testigo.

Cabe destacar que el *MOE* medido en pequeñas probetas sobreestima entre 12 % a 15% mientras que el *MOR* sobreestima en un rango de 40% a 85,6% a los valores obtenidos en vigas de tamaño estructural. Esto se debe a que el *MOR_f* está fuertemente influenciado de forma negativa por los defectos presentes en la madera (Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2, 2004, 2005, 2006). Se observa la tendencia de que la población de 100 árb/ha registra los valores más altos de *MOE* y *MOR*, pero las diferencias observadas entre esta

población y las demás no son significativas. Dichos valores podrían explicarse por la tendencia registrada en la densidad de la madera la cual tendría un determinado tipo de fibras con mayor espesor de pared lo cual le confiere una mayor resistencia mecánica a la madera.

Para poder caracterizar la madera con fines estructurales, se recomienda realizar estudios en vigas con tamaño estructural. Utilizar pequeñas probetas no es lo común en el análisis de la madera para fines estructurales, ya que éstas, como se mencionó anteriormente, no presentan defectos visibles como ocurre en probetas de mayores dimensiones y por lo tanto *MOE* y *MOR* pueden sufrir sobreestimaciones al analizarlos en pequeñas probetas. A pesar de estas desventajas, utilizar pequeñas probetas es útil para poder comparar distintos manejos, teniendo además una logística más simple que la elaboración de vigas de dimensiones comerciales.

4.3 CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

El análisis gráfico y estadístico de las correlaciones existentes entre la *Dac* y las propiedades de la madera (*MOEc*, *MOEf*, *MORc*, *MORf*) muestra que existe una correlación significativa y positiva entre ellas, con excepción del *MOEc* (Figuras 27 a 30).

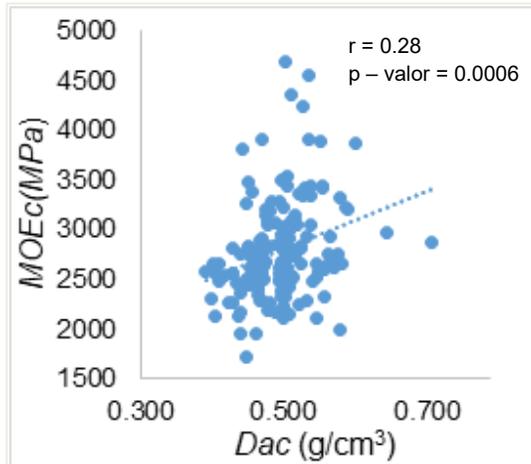


Figura Nro. 27. Correlación existente entre $MOEc$ (MPa) y Dac (g/cm³)

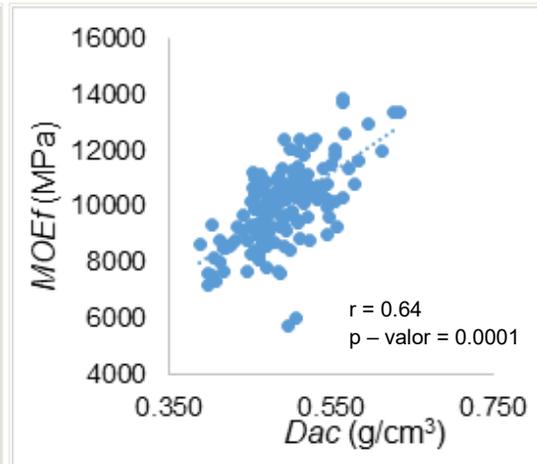


Figura Nro. 23. Correlación existente entre $MOEf$ (MPa) y Dac (g/cm³)

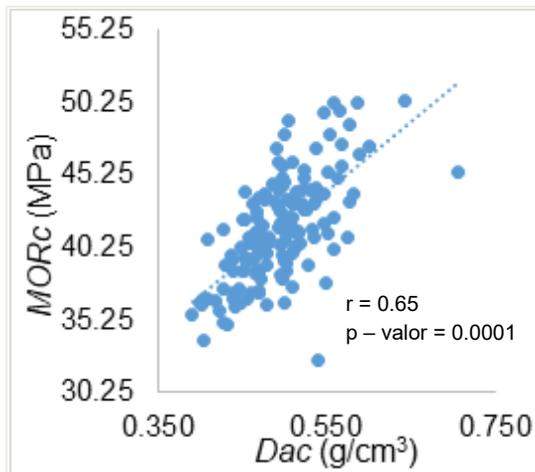


Figura Nro.29. Correlación existente entre $MORc$ (MPa) y Dac (g/cm³)

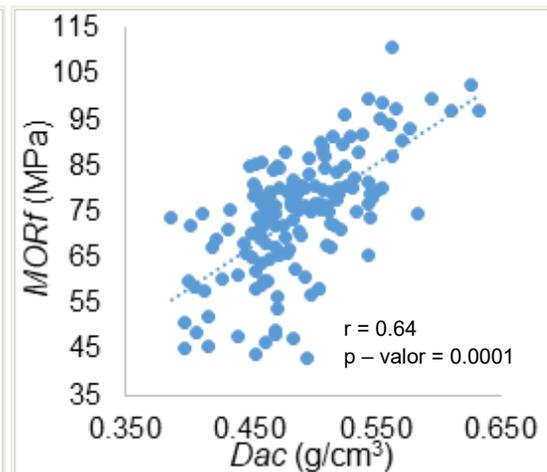


Figura Nro. 24. Correlación existente entre $MORf$ (MPa) y Dac (g/cm³)

Resultados similares fueron reportados por Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2006) los cuales determinaron altas correlaciones ($r = 0.806$) entre módulo de elasticidad y densidad corriente.

Los valores del coeficiente de correlación son altos tanto entre *Dac* y *MORc*, como entre *Dac* y *MORf*, por lo que el *Dac* se muestra como un mejor estimador de ambas variables.

En análisis de las correlaciones entre la *Dab* y las propiedades mecánicas de la madera muestran resultados similares a los obtenidos con la *Dac* en el sentido de que existe una asociación significativa y positiva entre estas variables a excepción del *MOEc* (Figuras 31 a 34).

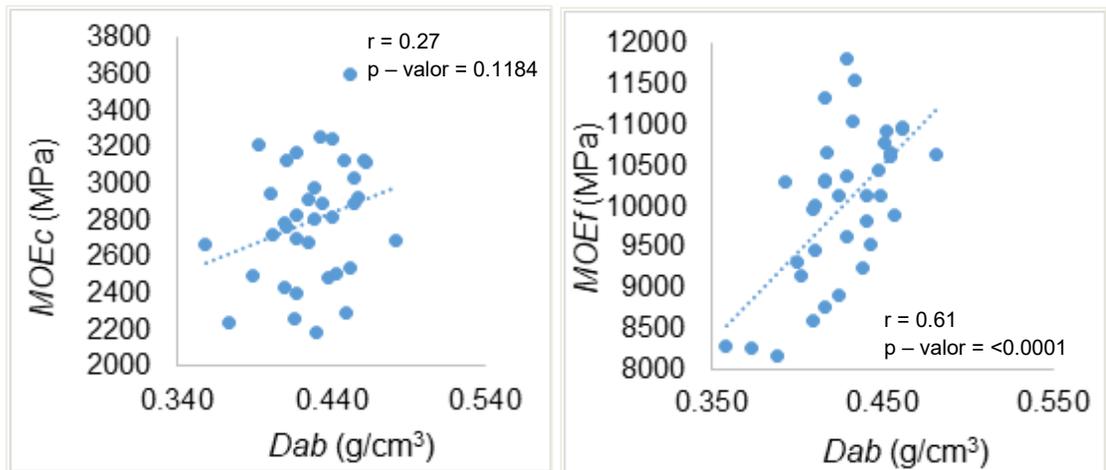


Figura Nro. 31. Correlación existente entre *MOEc* (MPa) y *Dab* (g/cm³) Figura Nro. 25. Correlación existente entre *MOEf* (MPa) y *Dab* (g/cm³)

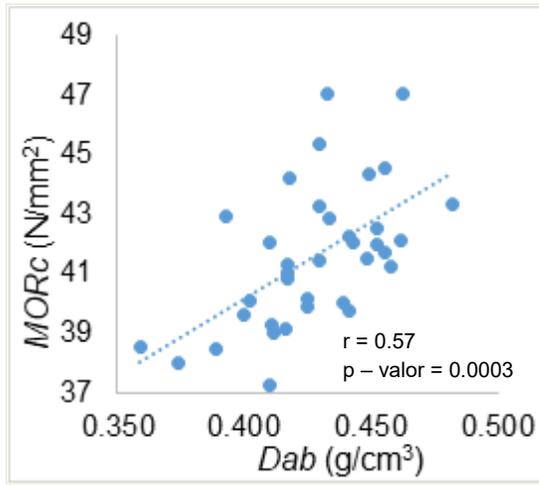


Figura Nro. 33. Correlación existente entre MOR_c (MPa) y Dab (g/cm^3)

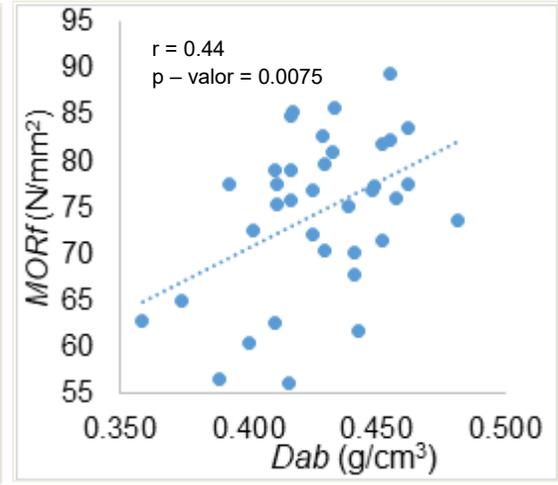


Figura Nro. 26. Correlación existente entre MOR_f (MPa) y Dab (g/cm^3)

Esto indica que el MOE_f puede ser inferido a través de la Dab , debido al valor de correlación obtenido (Figuras 31 a 34). García y Tarigo (2006) no encontraron valores de correlación altas entre MOE y densidad básica de pequeñas probetas. También se observa que la Dab es un buen indicador tanto de MOR_c como de MOR_f , debido a la alta correlación existente entre ambos.

Al analizar ambas densidades, se detecta que la Dac tiene valores más altos de correlación con las propiedades de la madera en relación a la Dab , debido a que aquella densidad fue calculada con las mismas probetas con las que se realizaron las propiedades mecánicas de la madera. Se puede observar que, para ambas densidades, el MOE_c obtuvo los menores correlación con la densidad.

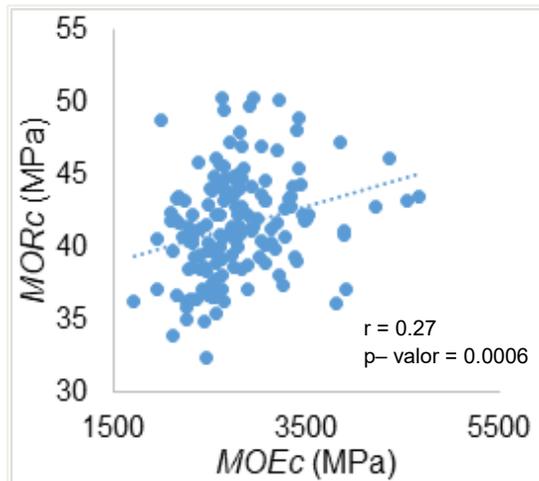


Figura Nro. 35. Correlación existente entre *MORc* (MPa) y *MOEc* (MPa)

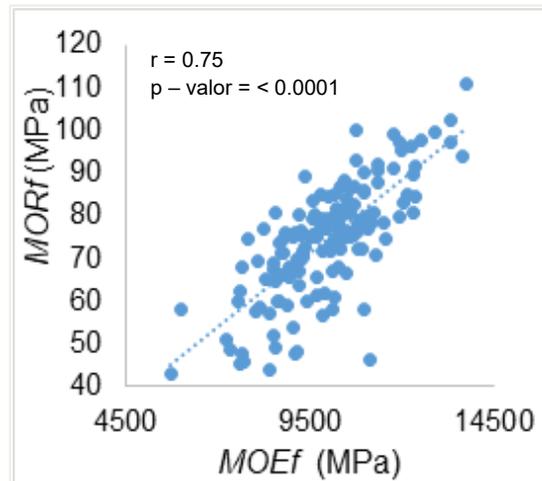


Figura Nro. 27. Correlación existente entre *MORf* (MPa) y *MOEf* (MPa)

La correlación existente entre *MORc* y *MOEc* es significativa, pero obtuvo valores menores en comparación con la correlación que presentan *MORf* y *MOEf* (Figuras Nro. 35 y 36). De acuerdo a Pérez del Castillo et al. (2000), uno de los parámetros más utilizados para estimar la resistencia de la madera es el módulo de elasticidad, el cual presenta gran correlación con el módulo de rotura. Olivera y Cárdenas (2007), también encontraron altas correlaciones ($r = 0.636$) entre módulo de elasticidad y módulo de rotura de flexión en pequeñas probetas para la especie *E. grandis*.

Grupo Técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2 (2004, 2005, 2006) encontraron valores de correlación entre módulo de elasticidad y módulo de rotura de 0.60 a 0.71 los cuales son algo inferiores, a los determinados en este trabajo.

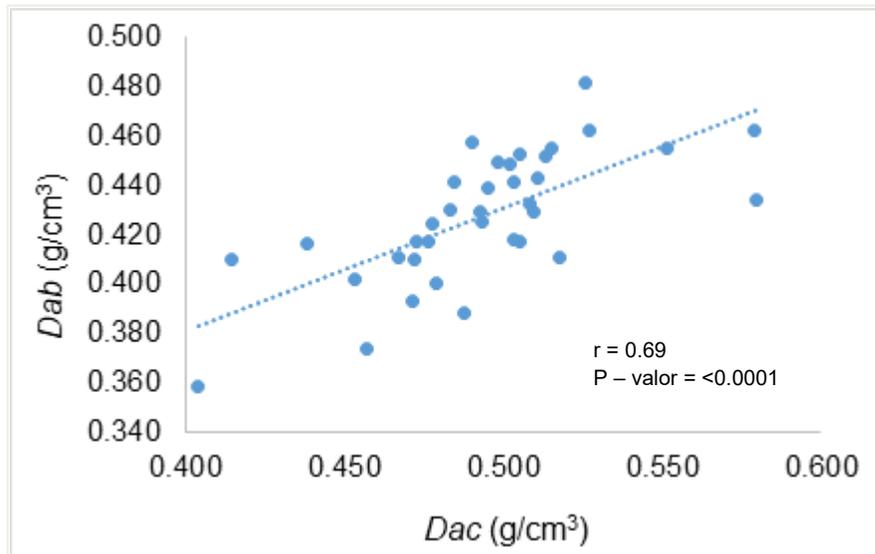


Figura Nro. 28. Correlación existente entre Dab (g/cm^3) y Dac (g/cm^3)

Los valores de correlación obtenidos muestran que en base a la densidad se puede inferir el comportamiento de las propiedades mecánicas de la madera, ya que para la Dac las correlaciones con MOR_f , MOR_c y MOE_f son relativamente altas (mayores a un 60%), y para el Dab las correlaciones con MOE_f y MOR_c son mayores a un 50% (Figura Nro. 28, 29, 30, 32, y 33). Se observa para ambas densidades una baja correlación, aunque significativa, con la propiedad MOE_c (Figura Nro. 27 y 31). Esto tiene la ventaja de que la determinación de la densidad es más sencilla y no destructiva con respecto a las determinaciones de las propiedades mecánicas.

Pérez del Castillo (2001) encontró en probetas libres de defectos de *E. grandis* valores de correlación entre densidad básica y el MOE de 0.624, y de 0.825 entre densidad y MOR , al mismo tiempo que una correlación de 0.895 entre MOE y MOR . Este mismo autor analizó las correlaciones existentes en compresión paralela a las fibras, donde para la densidad y MOR encontró correlaciones de 0.811

Olaso (2002) observó que, en los ensayos de pequeñas probetas hubo una correlación de 0.696 entre MOE y densidad.

Los valores existentes de correlación indican que la densidad corriente puede ser inferida a través de la densidad medida en discos, lo cual es una ventaja teniendo en cuenta la facilidad de la determinación de la densidad en discos con respecto a la determinación de la densidad en probetas de esas características (Figura Nro. 37).

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el ensayo, se concluye lo siguiente:

El raleo incrementa la tasa de crecimiento en diámetro de los árboles y la altura en menor medida. Esto sugiere que la altura media es poco dependiente de la densidad de población en los rangos evaluados en este ensayo. Esto determina que la realización de esquemas de raleo con menor densidad final se llega a madera de calidad determinada por grandes diámetros.

Al aumentar la densidad poblacional aumenta el volumen por hectárea, pero disminuyen los diámetros individuales, por lo que los raleos deben apuntar a un equilibrio entre los diámetros requeridos por la empresa y la máxima productividad por hectárea. Además, en este equilibrio se debe tener en cuenta el volumen de madera extraída en segundo raleo para obtener un beneficio económico de la realización del mismo.

Para aquellos esquemas de raleo donde se llegó a la misma población final mediante diferentes intensidades de raleos (200 y 300 árboles por hectárea), los crecimientos en *DAP*, *Ht*, *Vi* y *Vha* al año 20.8 mostraron mínimas diferencias. Esto muestra cierta flexibilidad al momento de manejar las poblaciones para llegar a niveles de producción final equivalentes.

La intensificación del raleo determina una mejora en la densidad de la madera, aunque esto no se traduce en cambios en las propiedades de resistencia. A través de la densidad de la madera se pueden inferir las propiedades de resistencia a la rotura y la flexión medidas en pequeñas probetas.

6. RESUMEN

El presente trabajo en *Eucalyptus grandis* se enmarca en un proyecto de investigación del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Su principal objetivo fue evaluar el efecto del raleo sobre el crecimiento, y las propiedades de la madera de *Eucalyptus grandis*. El monte seleccionado, se ubica en el departamento de Rivera, y la plantación fue realizada en el año 2000. El diseño experimental del ensayo fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones evaluando distintas intensidades de raleo llegando a densidades remanentes finales de 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 árboles por hectárea. Los esquemas de raleo se realizaron mediante la combinación de dos raleos los cuales fueron realizados en los años 2002 y 2008. Las variables analizadas fueron diámetro a la altura del pecho, altura total, Volumen individual, Volumen por hectárea, densidad aparente básica, densidad aparente corriente de la madera, *MOE* y *MOR*. Del análisis realizado se concluye que el raleo influye significativamente en las variables de crecimiento (*DAP*, *Ht*, *Vi*) donde con esquemas de raleo con menores poblaciones finales se llegan a los mayores valores de estas variables, lo contrario ocurre con el *Vha* donde con esquemas de raleo con mayores poblaciones finales se obtienen menores valores de la variable. Además, el raleo tiene una influencia significativa en la densidad de la madera y no se encontraron diferencias significativas con las propiedades mecánicas (*MOE* y *MOR*) de flexión y compresión. Por lo que para obtener madera de calidad que está determinada por grandes diámetros se debe llegar a esquemas de raleo con menor densidad final, lo que ocasiona además un aumento de la densidad de la madera. Además, en el presente estudio se encontraron correlaciones entre densidad y propiedades mecánicas, por lo que se puede inferir una propiedad a partir de la otra.

Palabras clave: *Eucalyptus*; *Eucalyptus grandis*; raleo; *MOE*; *MOR*; densidad; propiedades de la madera; crecimiento; altura; *DAP*; volumen por hectárea; forestación en Uruguay

7. SUMMARY

The present work on *Eucalyptus grandis* is part of a research project of the National Institute of Agricultural Research (INIA). Its main objective was to evaluate the effect of thinning on growth and the properties of *Eucalyptus grandis* wood. The selected forest is located in the department of Rivera, and the plantation was carried out in the year 2000. The experimental design of the trial was randomized complete blocks, with three repetitions evaluating different intensities of thinning, reaching final remaining densities of 100, 150, 200, 250, 300, 350 and 400 trees per hectare. The thinning schemes were carried out by combining two thinnings episodes which were carried out in 2002 and 2008. The variables analyzed were diameter at breast height, total height, individual volume, volume per hectare, basic apparent density, apparent density wood current, *MOE* and *MOR*. From the analysis carried out, it is concluded that thinning significantly influences the growth variables (*DBH*, *Ht*, *Vi*) where with thinning schemes with lower final populations the highest values of these variables are reached, the opposite occurs with *Vha* where with schemes of thinning with higher final populations, lower values of the variable are obtained. In addition, thinning has a significant influence on the density of the wood and no significant differences were found with the mechanical properties (*MOE* and *MOR*) of bending and compression. Therefore, to obtain quality wood that is determined by large diameters, thinning schemes with a lower final density must be reached, which also causes an increase in the density of the wood. In addition, in the present study, correlations were found between density and mechanical properties, so one property can be inferred from the other.

Keywords: *Eucalyptus*, *Eucalyptus grandis*; thinning; *MOE*; *MOR*; density; wood properties; growth; height; *DBH*; volume per hectare; forestation in Uruguay

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alcorn, P. J.; Pyttel, P.; Bauhus, J.; Smith, R. G. B.; Thomas, D.; James, R.; Nicotra, A. 2007. Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. *Forest Ecology and Management*. 252(1-3): 41 - 51.
2. Arbeletche, P.; Guibert, M. 2018. Las dinámicas agropecuarias del siglo XXI en Uruguay. *Pampa (Santa Fe)*. no. 18: 31 - 54.
3. Balloni, E. A.; Simões, J. W. 1980. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. *IPEF - Série técnica*. 1(3): 1 - 16.
4. Barrios, M. F.; García, M. D.; Balzarini, M. 2016. Modelos de crecimiento para *Eucalyptus grandis* en la región sur de la mesopotamia Argentina: Avances II: estructura de la base de datos. In: Jornadas forestales de Entre Ríos (30^a., 2016, Concordia). Trabajos presentados. Concordia, INTA. pp. 1 - 4.
5. Barros, S. 2012. El género *Eucalyptus*. *Ciencia e Investigación Forestal*. 18(3): 75 - 100.
6. Berger, R. 2000. Crecimiento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. *Dissertação Mestrado Engenharia Florestal*. Santa María, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. 126 p.
7. _____.; Schneider, P. R.; Guimarães, C. A.; Haselein, C. R. 2002. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* smith. *Ciência Florestal*. 12(2): 75 - 78.

8. Boscana, M.; Boragno, L. 2020. Encuesta de aserraderos 2020: informe final, agosto 2020. Montevideo, MGAP. 45 p.
9. Brussa, C. A. 1994. Eucalyptus: especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
10. Bustos, J. J. 2020. Propiedades físicas, mecánicas y trabajabilidad de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de la estación experimental La Favorita, Santo Domingo de los Tsachilas. Tesis Ing. Forestal. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. 75 p.
11. Carpineti, L. A.; Dalla Tea, F.; Glade, J. E.; Marco, M. A. eds. 1995. Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Concordia, INTA. 162 p.
12. Carrillo, I.; Aguayo, M. G.; Valenzuela, S.; Teixeira, R. M. 2015. Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus globulus* genotypes with different wood density. (en línea). Wood Research. 60(1): 1 - 10. Consultado dic. 2022. Disponible en <http://www.woodresearch.sk/wr/201501/01.pdf>
13. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR). 1994. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maid., especie de árbol de uso múltiple en América central. Turrialba. 38 p. (Informe Técnico no. 235).
14. CORMA (Corporación Chilena de la madera, CL). 2004. Manual: la construcción de viviendas en madera. Concepción. 635 p.

15. Coronel, E. O. 1994a. 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. v.1, 187 p.
16. _____. 1994b. 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. v.2, 329 p.
17. Cueto, G. 2012. Influencia del raleo sobre la productividad y calidad de la madera en *Euclayptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 73 p.
18. _____.; Rachid, C.; O'Neill, H.; Ohta, S.; Resquín, F. 2013. Influencia del raleo sobre las propiedades físico - mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*. Revista INIA. no. 34: 48 - 51.
19. Díaz, S.; Espinosa, M.; Valenzuela, L.; Cancino, J.; Lasserre, J. P. 2012. Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. Maderas: ciencia y tecnología. 14(3): 373 - 388.
20. Doldán, J. 2003. Indicadores de calidad de madera *Eucalyptus grandis* de Río Negro, Uruguay: contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibras. Montevideo, LATU. 42 p. (Informe de Investigación no. 9).
21. Espinosa, M. B.; Muñoz, F. S. 2005. Silvicultura de plantaciones: apuntes de clases. Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. 153 p.

22. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma. 790 p.
23. _____. 2004. Estado y tendencias de la ordenación forestal en 17 países de América Latina: resumen del estado actual del manejo y ordenación forestal en Uruguay. (en línea). Roma. s.p. Consultado dic. 2022. Disponible en https://www.fao.org/3/j2628s/J2628S18.htm#P1847_297885
24. García, G.; Tarigo, J. 2006. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos plantaciones de *Eucalyptus grandis Hill* (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 85 p.
25. García, M.; Mastrandrea, C.; Flores, M.; De La Peña, C. 2017. Curso: principios técnicos para el cultivo de especies forestales de Entre Ríos: aspectos ambientales, manejo, costos y rentabilidad forestal. Chajarí, INTA. 19 p.
26. Gendvilas, V.; Downes, G. M.; Neyland, M.; Hunt, M.; Harrison, P. A.; Jacobs, A.; Williams, D.; O'Reilly-Wapstra, J. 2021. Thinning influences wood properties of plantation-grown *Eucalyptus nitens* at three sites in Tasmania. (en línea). *Forests*. 12(10): 1304. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/f12101304>
27. Gonçalves, J. C.; Breda, L.; Barros, J. F.; Macedo, D. G.; Janin, G.; Da Costa, A. F.; Teiceira, A. 2006. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden* e *Eucalyptus cloeziana F. Muell* visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. *Ciência Florestal*. 16(3): 329 - 341.

28. Granados, D.; López, G. F. 2006. Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente. 13(2): 143 - 156.
29. Grupo técnico de madera aserrada de Eucalipto GT2, UY. 2004. Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del Norte de Uruguay. Montevideo, MGAP. 45 p. (Informe no. 5).
30. _____. 2005. Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* Maiden del norte de Uruguay. Montevideo, LATU. 44 p. (Informe no. 4).
31. _____. 2006. Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* Maiden del centro del Uruguay. Montevideo, LATU. 56 p. (Informe no. 6).
32. Kojima, M.; Yamaji, F. M.; Yamamoto, H.; Yoshida, M.; Nakai, T. 2009. Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Eucalyptus grandis* from different latitudes in Brazil and Argentina. Forest Ecology and Management. 257(10): 2175 - 2181.
33. Kretschmann, D. E. 2010. Mechanical properties of wood. In: USDA (United States Department of Agriculture, US). Wood handbook: wood as an engineering material. Madison. p. irr.
34. Larocca, F.; Dalla Tea, F.; Aparicio, J. L. 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. In: Jornadas Forestales de Entre Ríos (19^a., 2004, Entre Ríos). Trabajos presentados. Concordia, s.e. pp. 1 - 16.
35. Lima, I. L. 2005. Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. Tesis Dr. Recursos Florestais. São Paulo, Brasil. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 137 p.

36. _____.; García, J. N. 2005. Influência do desbaste em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. Revista do Instituto Florestal. 17(2): 151 - 160.
37. _____.; _____. 2010. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* hill ex-maiden. Revista Árvore. 34(3): 551 - 559.
38. Malan, F. S.; Hoon, M. 1992. Effect of Initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. (en línea). South African Forestry Journal. 163(1): 13 - 20. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1080/00382167.1992.9629362>
39. _____. 2005. The effect of planting density on the wood quality of south african-grown *Eucalyptus grandis*. (en línea). Southern African Forestry Journal. 205(1): 31 - 37. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.2989/10295920509505235>
40. MARENA. INAFOR (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Institución Nacional Forestal, NI). 2002. Guía de especies forestales de Nicaragua. Managua, Editora de Arte. 304 p.
41. Methol, R. 1999. Ensayos de raleo en *Eucalyptus grandis*. In: Seminario del Programa Nacional Forestal (1999, Tacuarembó). Trabajos presentados. Tacuarembó, INIA. pp. 51 - 61. (Actividades de Difusión no. 189).
42. MGAP. DGF (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Forestal General, UY). 2021. Cartografía nacional forestal 2021. Montevideo. 12 p.

43. _____. OPYPA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, UY). 2018. Anuario OPYPA. Montevideo. 665 p.
44. _____. _____. 2020. Anuario OPYPA. Montevideo. 666 p.
45. _____. _____. 2021. Anuario OPYPA. Montevideo. 578 p.
46. Montes, G. M. F.; Rubbo, B. D. 2008. Valores característicos de módulo de elasticidad y módulo de rotura para madera de *Eucalyptus grandis* cultivados en Rivera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 43 p.
47. Muñoz, F.; Espinosa, M.; Herrera, M. A.; Cancino, J. 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. Bosque (Valdivia). 26(1): 93 - 99.
48. Navarrete, E. R.; Figueroa, X.; Novoa, P. A.; Espinosa, M. A. 2009. Efecto del manejo silvícola y clase de copa sobre la densidad básica de *Eucalyptus nitens*. Revista Floresta. 39(2): 345 - 354.
49. Nutto, L.; Touza, V. M. C. 2006. Modelos de producción de madera sólida en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de Galicia. Boletín Informativo CIDEU. no. 2: 37 - 50.
50. Olaso, E. 2002. Estudio de la variación en las propiedades físicas y mecánicas de *Eucalyptus grandis* (Hill) Ex Maiden del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 81 p.

51. Oliveira Neto, S. N.; Reis, G.; Reis, M.; Leite, H.; Neves, J. C. 2010. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. *Floresta*. 40(4): 755 - 762.
52. Olivera, C.; Cárdenas, P. 2007. Evaluación de las propiedades físicas y fundamentales, mecánicas y clasificación visual de tablas de madera de una plantación de *Eucalyptus grandis* Maiden ex Hill del departamento de Durazno de 26 años de edad. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 82 p.
53. Oyhançabal, W. 2005. El mecanismo para un desarrollo limpio en el Uruguay: hacia una nueva relación entre ganadería y silvicultura. *Unasyva*. 56(222): 19 - 23.
54. Pérez del Castillo, A.; De Castro, R.; Ohta, S. 2000. Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA (1998-2003): ensayos de propiedades mecánicas y calidad de madera de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. (en línea). Montevideo, LATU. 25 p. (Informe de Investigación. Serie Forestales no. 1). Consultado dic. 2022. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562

55. _____. 2001. Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA (1998-2003): propiedades mecánicas y calidad de madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU. 35 p. (Informe de Investigación. Serie Forestales no. 4). Consultado dic. 2022. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=567
56. Rachid, C.; Mason, E. G.; Woollons, R.; Resquín, F. 2014. Volume and taper equations for *P. taeda* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). Agrociencia (Uruguay). 18(2): 47 - 60.
57. Resquín, F.; Navarro-Cerrillo, R. M.; Carrasco-Letelier, L; Casnati, C. R. 2019. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. (en línea). Forest Ecology and Management. 438: 63 - 74. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>
58. Shepherd, K. R. 1986. Plantation silviculture. Dordrecht, Springer. 322 p.
59. SPF (Sociedad De Productores Forestales del Uruguay, UY). 2022. Forestación y zonas forestadas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://spf.com.uy/forestacion-zonas-forestadas/>
60. Thomas, D. S.; Montagu, K. D.; Conroy, J. P. 2006. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. Tree Physiology. 27(2): 251 - 260.

61. Trevisan, R. 2006. Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Dissertação de mestrado. Santa María, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. 138 p.
62. _____.; Denardi, L.; Haselein, R.; Gatto, A. 2012. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. Scientia Forestalis. 40(95): 393 - 399.
63. Uruguay XXI, UY. 2021. Sector forestal en Uruguay. (en línea). Montevideo. 49 p. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>
64. Van Laar, A. 1961. Eucalyptus saligna in South Africa: an investigation into the silviculture and economics. Stellenbosch, University of Stellenbosch. 110 p. (Annale Universiteit Van Stellenbosch no. 36).
65. Zobel, B. J.; Buijtenen, J. P. 1989. Wood variation: its causes and control. Berlín, Springer. 363 p.
66. _____.; Jett, J. B. 1995. Genetics of wood production. Berlín, Springer. 337 p.

9. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de varianza de la variable *DAP*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	9	1183.08	131.45	76.28	<.000 1
Error	20	34.47	1.72		
Total corregido	29	1217.55			
R2	Coef. Var.	RCME	Media de <i>DAP</i>		
0.97	3.07	1.31	42.81		

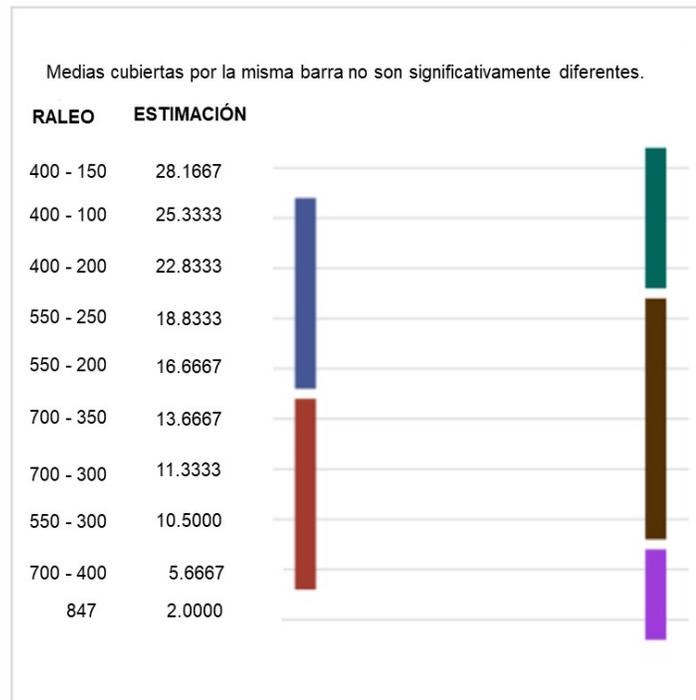
Anexo 2. Análisis de comparación de medias de la variable *DAP* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 3. Análisis de varianza de la variable *Ht*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	9	266.47	29.61	20.61	<.0001
Error	20	28.73	1.44		
Total corregido	29	295.19			
R2	Coef. Var	RCME	Media de <i>Ht</i>		
0.90	2.57	1.20	46.58		

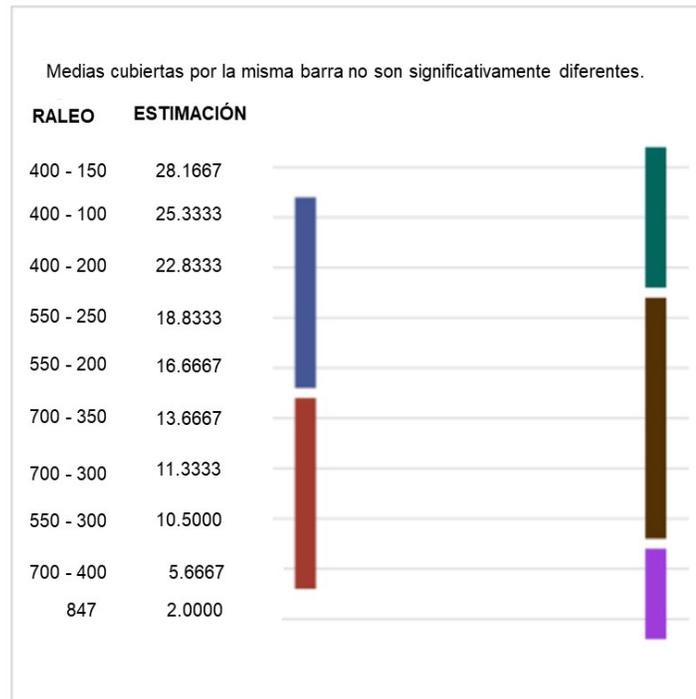
Anexo 4. Análisis de comparación de medias de la variable *Ht* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 5. Análisis de varianza de la variable V_i

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	9	19.51	2.17	61.15	<.0001
Error	20	0.71	0.03		
Total corregido	29	20.22			
R^2	Coef. Var	RCME	Media de V_i		
0.96	6.57	0.19	2.87		

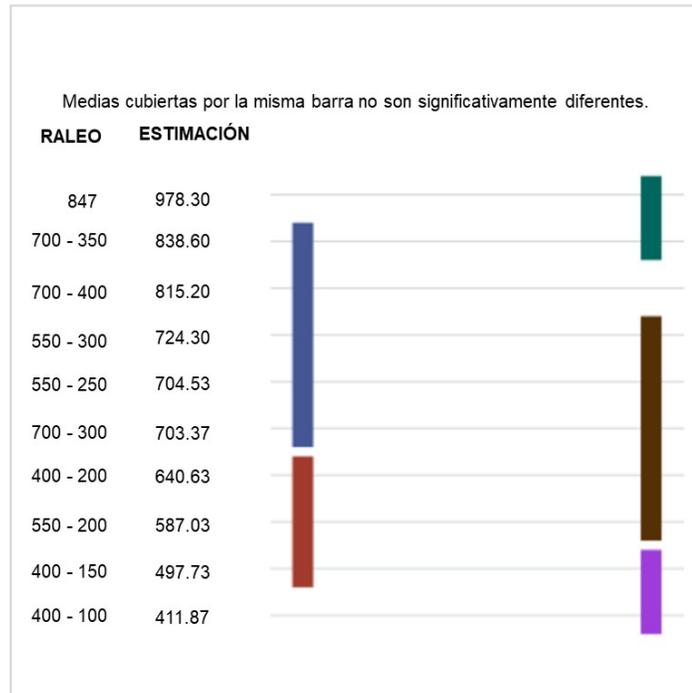
Anexo 6. Análisis de comparación de medias de la variable V_i mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 7. Análisis de varianza de la variable *Vha*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	9	749411.53	83267.95	35.23	<.0001
Error	20	47264.36	2363.22		
Total corregido	29	796675.8937			
R ²	Coef. Var.	RCME	Media de <i>Vha</i>		
0.94	7.04	48.61	690.16		

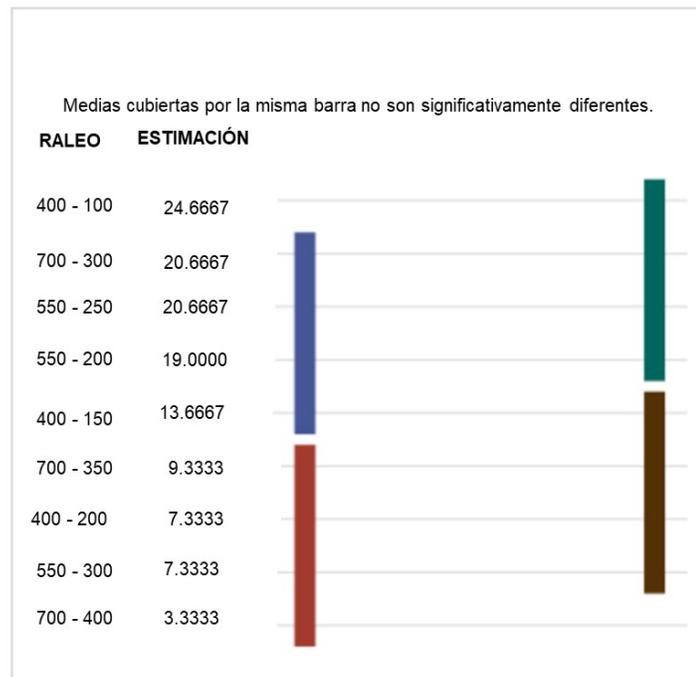
Anexo 8. Análisis de comparación de medias de la variable *Vha* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 9. Análisis de varianza de la variable *Vha* raleo 2008

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	8	1356.67	169.58	10.85	<.0001
Error	18	281.33	15.63		
Total corregido	26	1638.00			
R ²	Coef. Var	RCME	Media de <i>Vha</i> raleo 2008		
0.83	28.24	3.95	14.00		

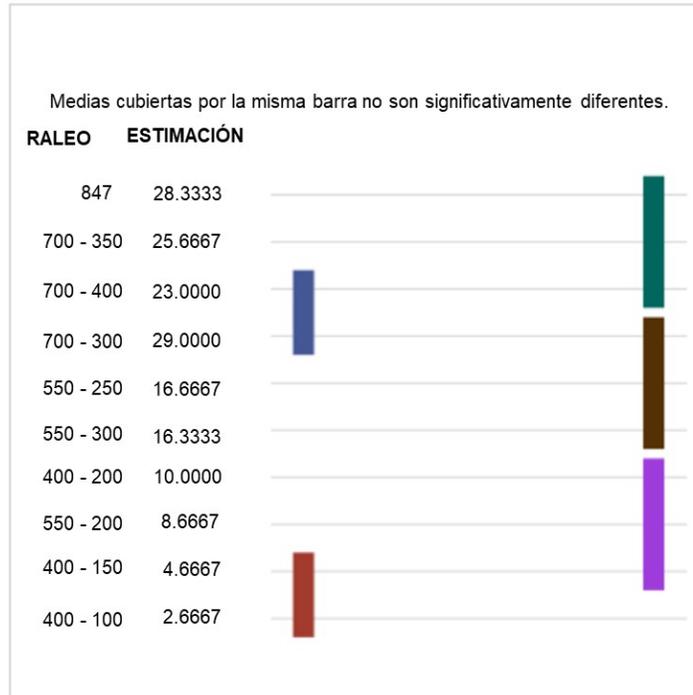
Anexo 10. Análisis de comparación de medias de la variable *Vha* raleo 2008 mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 11. Análisis de varianza de la variable *Vha* total (*Vha* raleo 2008 + *Vha*).

Origen	GL	Cuadrado		Valor F	Pr > F
		Suma de cuadrados	medio del error		
Modelo	9	2092.83	232.54	30.07	<.0001
Error	20	154.67	7.73		
Total corregido	29	2247.50			
R ²	Coef. Var	RCME	Media de <i>Vha</i> total		
0.93	17.94	2.78	15.50		

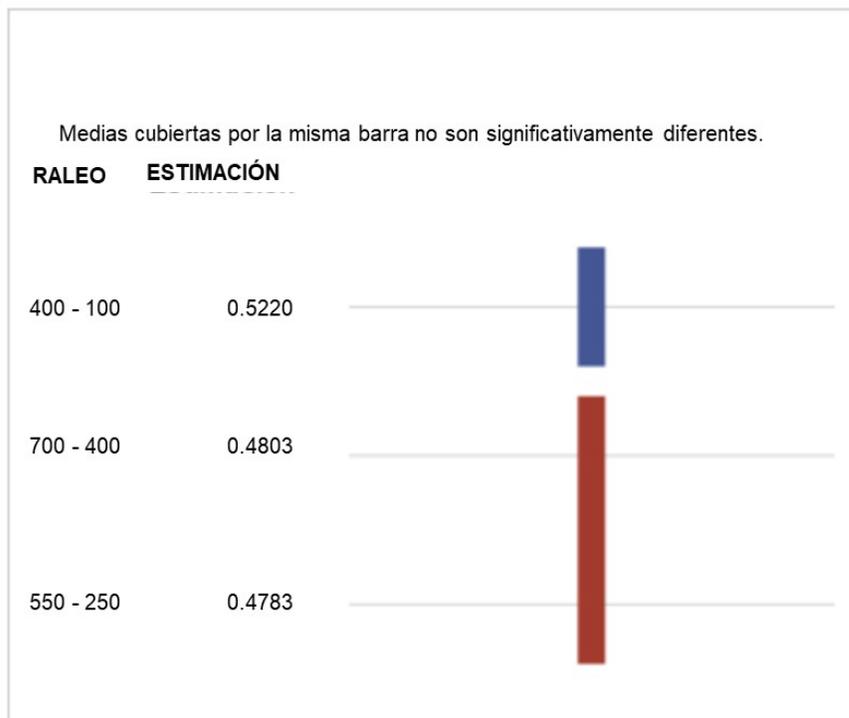
Anexo 12. Análisis de comparación de medias de la variable (*Vha* raleo 2008 + *Vha*) mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 13. Análisis estadístico para la variable *Dac*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	0.004	0.0018	9.65	0.0133
Error	6	0.001	0.00018		
Total corregido	8	0.005			
R^2	Coef. Var.	RCME	Media de <i>Dac</i>		
0.76	2.78	0.014	0.49		

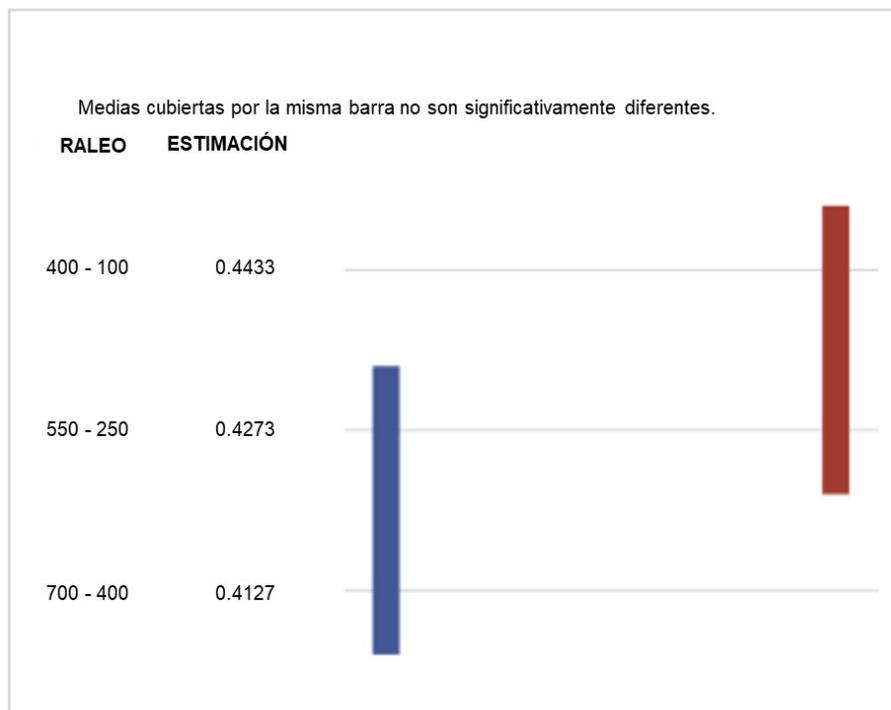
Anexo 14. Análisis de comparación de medias de la variable *Dac* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 15. Análisis estadístico para la variable *Dabp*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	0.0014	0.00071	9.62	0.013
Error	6	0.00044	0.000073		
Total corregido	8	0.0018			
R ²	Var Coef.	RCME	Media de <i>Dabp</i>		
0.76	2.0012	0.008	0.43		

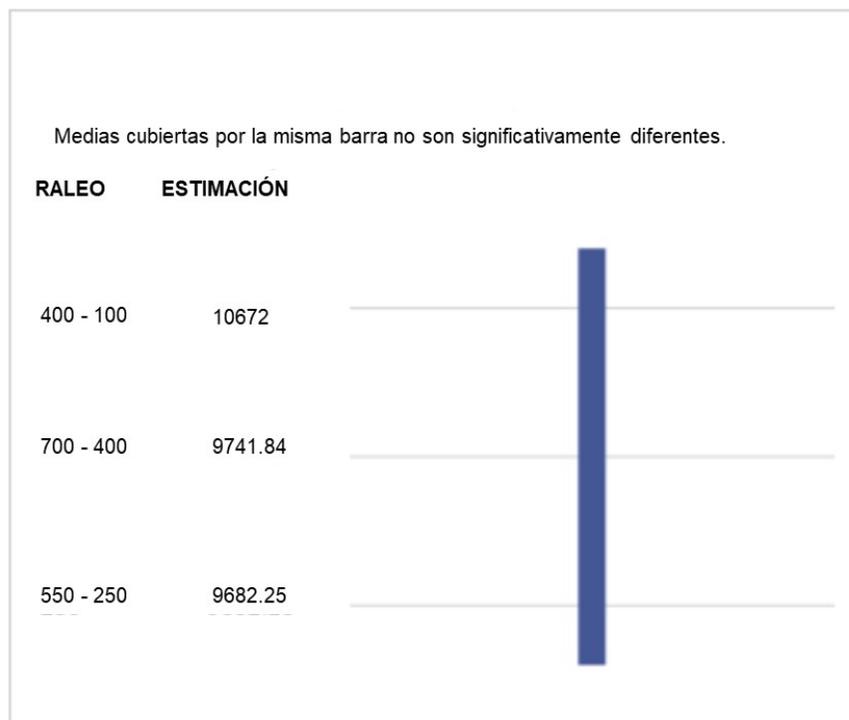
Anexo 16. Análisis de comparación de medias de la variable *Dabp* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 17. Análisis estadístico para la variable *MOEf*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	1848719.72	924359.86	2.51	0.161
Error	6	2205967.32	367661.22		
Total corregido	8	4054687.04			
R ²	Coef. Var	RCME	Media de <i>MOEf</i>		
0.46	6.04	606.35	10032.06		

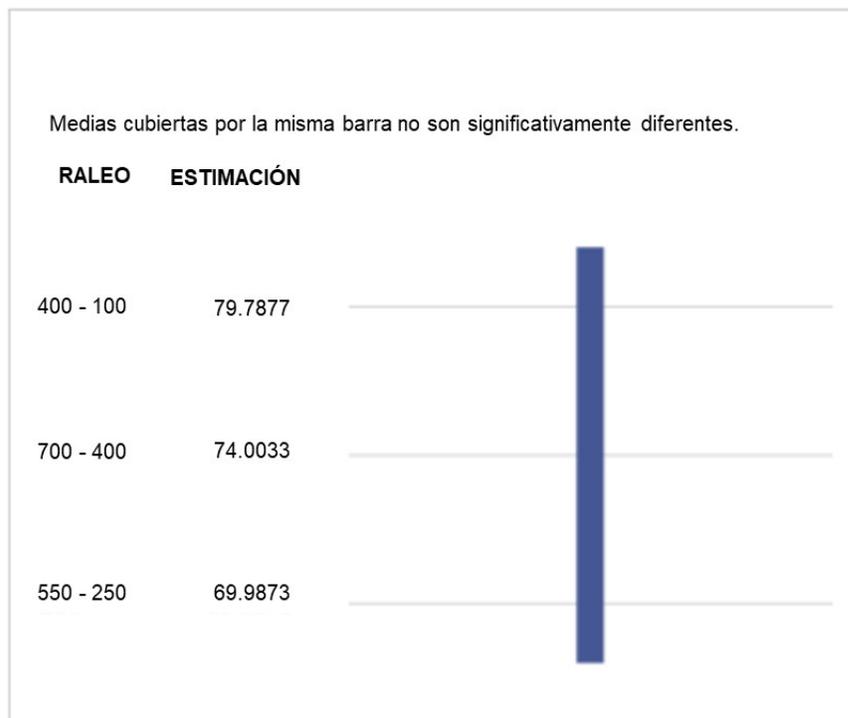
Anexo 18. Análisis de comparación de medias de la variable *MOEf* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 19. Análisis estadístico para la variable *MOEf*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	145.63	72.82	3.04	0.12
Error	6	143.84	23.97		
Total corregido	8	289.48			
R ²	Coef. Var.	RCME	Media de <i>MOEf</i>		
0.50	6.56	4.90	74.59		

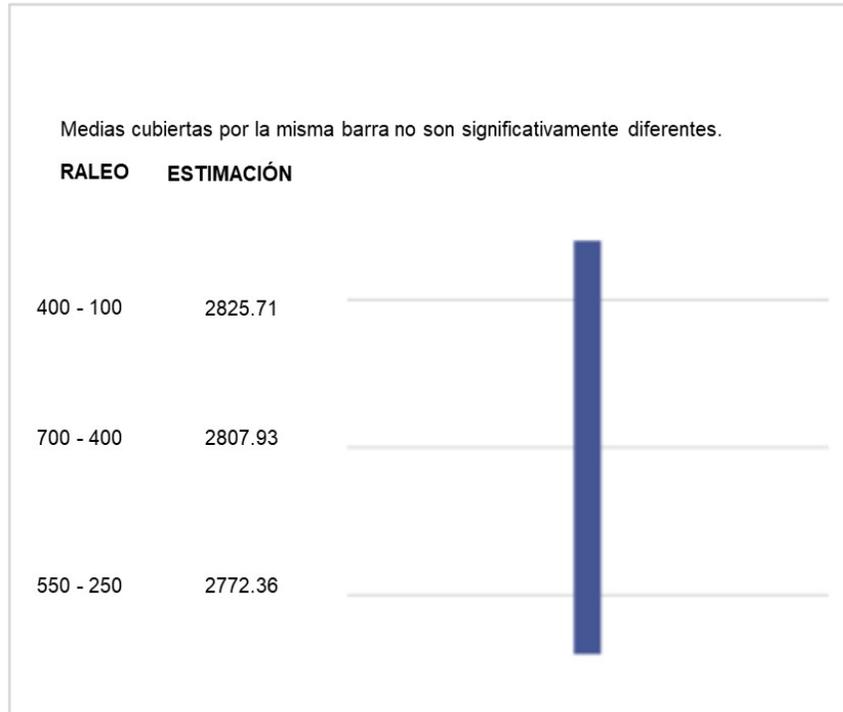
Anexo 20. Análisis de comparación de medias de la variable *MOEf* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 21. Análisis estadístico para la variable *MOEc*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	4079.65	2039.83	0.02	0.976
Error	6	501719.03	83619.84		
Total corregido	8	505798.69			
R^2	Coef. Var	RCME	Media de <i>MOEc</i>		
0.0081	10.32	289.17	2802.66		

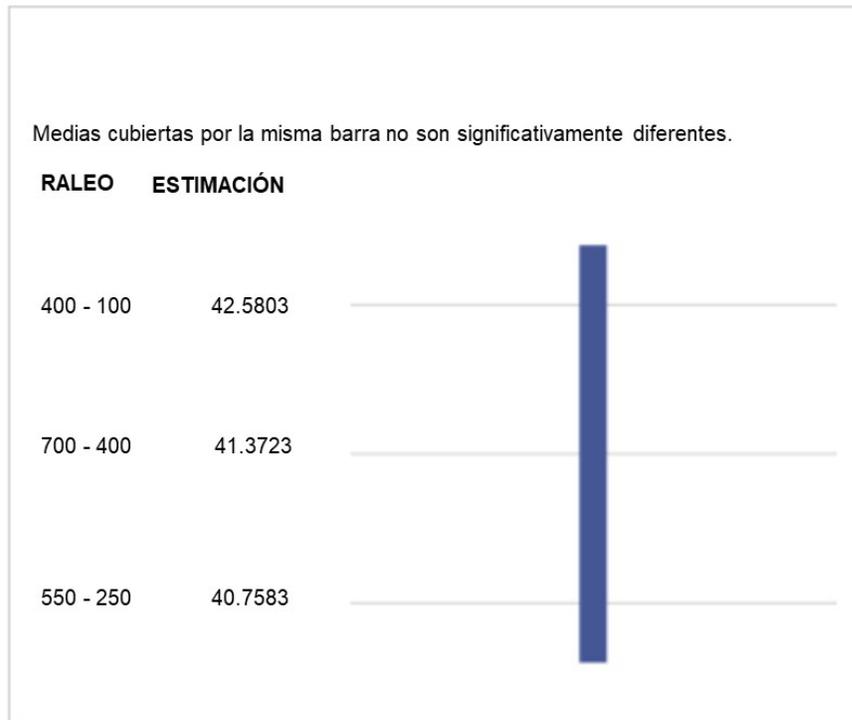
Anexo 22. Análisis de comparación de medias de la variable *MOEc* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 23. Análisis estadístico para la variable *MORc*

Origen	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor F	Pr > F
Modelo	2	5.16	2.578	1.68	0.26
Error	6	9.19	1.53		
Total corregido	8	14.35			
R ²	Coef. Var	RCME	Media de <i>MORc</i>		
0.36	2.98	1.24	41.57		

Anexo 24. Análisis de comparación de medias de la variable *MORc* mediante el Test de Bonferroni con un nivel de probabilidad de 0.05.



Anexo 25. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dab* (g/cm³) y *MOEc* (MPa).

	<i>Dab</i>	<i>MOEc</i>
<i>Dab</i>	1.00	0.26
p - valor		0.12
<i>MOEc</i>	0.26	1.00
p - valor	0.12	

Anexo 26. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dab* (g/cm³) y *MOEf* (MPa).

	<i>Dab</i>	<i>MOEf</i>
<i>Dab</i>	1.00	0.61
p - valor		<.0001
<i>MOEf</i>	0.61	1.00
p - valor	<.001	

Anexo 27. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dab* (g/cm³) y *MORc* (MPa).

	<i>Dab</i>	<i>MORc</i>
<i>Dab</i>	1.00	0.57
p - valor		0.0003
<i>MORc</i>	0.57	1.00
p - valor	0.0003	

Anexo 28. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dab* (g/cm³) y *MORf* (MPa).

	<i>Dab</i>	<i>MORf</i>
<i>Dab</i>	1.00	0.44
p - valor		0.0075
<i>MORf</i>	0.44	1.00
p - valor	0.0075	

Anexo 29. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dac* (g/cm³) y *MOEc* (MPa).

	<i>Dac</i>	<i>MOEc</i>
<i>Dac</i>	1.00	0.28
p - valor		0.0006
<i>MOEc</i>	0.28	1.00
p - valor	0.0006	

Anexo 30. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dac* (g/cm³) y *MOEf* (MPa).

	<i>Dac</i>	<i>MOEf</i>
<i>Dac</i>	1.00	0.64
p - valor		<.0001
<i>MOEf</i>	0.64	1.00
p - valor	<.0001	

Anexo 31. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dac* (g/cm³) y *MORc* (MPa).

	<i>Dac</i>	<i>MORc</i>
<i>Dac</i>	1.00	0.65
p - valor		<.0001
<i>MORc</i>	0.65	1.00
p - valor	<.0001	

Anexo 32. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dac* (g/cm³) y *MORf* (MPa).

	<i>Dac</i>	<i>MORf</i>
<i>Dac</i>	1.00	0.64
<i>MORf</i>	0.64	1.00
		<.0001
	<.0001	

Anexo 33. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *MOEc* (MPa) y *MORc* (MPa).

	<i>MOEc</i>	<i>MORc</i>
<i>MOEc</i>	1.00	0.27
<i>MORc</i>	0.27	1.00
		0.0006
	0.0006	

Anexo 34. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *MOEf* (MPa) y *MORf* (MPa)

	<i>MOEf</i>	<i>MORf</i>
<i>MOEf</i>	1.00	0.75
<i>MORf</i>	0.75	1.00
p - valor		<.0001
p - valor	<.0001	

Anexo 35. Matriz con coeficientes de correlación de Pearson para las variables *Dabp* (g/cm³) y *Dac* (g/cm³).

	<i>Dabp</i>	<i>Dac</i>
<i>Dabp</i>	1.00	0.65
p - valor		<.0001
<i>Dac</i>	0.65	1.00
p - valor	<.0001	