

**Facultad de Ciencias Económicas y de la Administración
Universidad de la República**

Efectos de tratamientos silvícolas sobre la variables
dendrométricas en Eucaliptus en suelos de Rivera.

Jairo Cugliari Duhalde

Para obtener el título de:
Licenciado en Estadística

Tutores: Ing. Agr. Juan Cabris
Msc. Laura Nalbarte

Agosto 2007

Efectos de tratamientos silvícolas sobre la calidad de la
madera en *Eucalyptus* en suelos de Rivera

Informe Final de Pasantía

Jairo Cugliari Duhalde

Resumen

Diversos aspectos naturales del crecimiento y desarrollo de los árboles degradan la calidad de la madera. Es posible controlar mediante manejos silviculturales estos aspectos para producir madera sin defectos. La empresa forestal COLONVADE SA instaló en el año 2000 un ensayo en que se probaron diferentes manejos de podas y raleos. Se ajustaron modelos lineales para el diámetro a la altura del pecho media por parcela, la altura media por parcela y el volumen total por parcela utilizando como variables explicativas los diferentes manejos y covariables que midieron la situación de competencia entre los árboles.

Para la altura media por parcela no se obtuvo ningún modelo significativo (se trabajó al 5 % de significación), mientras que para las restantes variables se obtuvieron modelos ajustados por covariables y otros sin ajustar. En todos los casos la variable poda no resultó significativa.

Para determinar la alternativa de mejor performance se realizaron pruebas de comparaciones múltiples. El mejor manejo con la información al sexto año es realizar una reducción drástica temprana de la densidad de plantación. En el ensayo esto consistió en reducir a la mitad la densidad original al año de instalado el ensayo. Este resultado no se logra sin comprometer el volumen total por parcela, de hecho al sexto año este manejo es el que genera el menor volumen de producción.

Es de esperar que en los próximos años de crecimiento los árboles que estén en condiciones de mayor espaciamiento tengan un mejor desarrollo que los restantes, por lo que se espera que se compense el menor volumen total por parcela provocado por el menor número de árboles con un mayor volumen individual.

Índice general

Índice general	1
1. Introducción	3
2. Objetivos	6
2.1. Objetivo general	6
3. Marco teórico forestal	10
3.1. Elementos naturales que inciden en el crecimiento y desarrollo de los árboles	10
3.2. Tratamiento silvícola	12
3.3. Madera de calidad	16
4. Marco teórico estadístico	19
4.1. Diseño Estadístico de Experimentos	19
4.1.1. Principios de DEE	20
4.1.2. Algunas definiciones	21
4.1.3. Componentes del DEE	21
4.2. Algunos diseños	22
4.2.1. Diseño Completamente Aleatorizado a una vía	23
4.2.2. Diseño en Bloques Completamente Aleatorizado a una vía	23
4.2.3. Diseño factorial	24

4.2.4. Diseños corregidos por covariables	25
4.3. Modelos Lineales	25
4.3.1. Estimación	26
4.3.2. Diagnóstico del modelo	27
4.3.3. Pruebas de hipótesis	27
5. Análisis descriptivo	32
5.1. Plan de trabajo de la empresa	32
5.1.1. Evolución del ensayo	34
5.1.2. Resultados anteriores	34
5.2. Los datos	35
5.3. Registros dendrométricos	35
5.4. Indicadores de competencia	38
6. Análisis de resultados	48
6.1. Ajuste de modelos	48
6.2. Grupo I: Modelos sin covariables	50
6.3. Grupo II: Modelos con covariables	52
6.4. Resumen de modelos válidos	54
6.5. Determinación del manejo óptimo	57
7. Síntesis y conclusiones	62
Bibliografía	64

CAPÍTULO 1

Introducción

El sector maderero no es nuevo en el Uruguay. La forestación con fines industriales comienza en la década de 1960, con la Ley Forestal N°13.723 de 1967, pero en verdad experimenta un desarrollo notorio en la década de 1990, por un lado con la promulgación de la Ley Forestal N° 15.939 en 1987 y en segundo lugar con el lanzamiento del Plan Nacional de Forestación.

La Ley Forestal prohíbe la tala del bosque nativo y bosques protectores de otros recursos naturales, poniendo al Uruguay a la vanguardia en materia forestal y ambiental, lo cual estimula a los inversionistas de otros sectores de la economía nacional o a empresas del exterior, a desarrollar proyectos para la exportación no tradicional de productos forestales.

En una superficie del orden de 3.6 millones de hectáreas de suelos clasificados como de prioridad forestal y con alrededor de 1.500 emprendimientos de diferentes tamaños y perfiles, el sector forestal sobrepasó en menos de cinco años, la meta de 200.000 hectáreas fijada inicialmente por el Plan Nacional de Forestación.

Casi dos décadas de la promulgación de la ley de referencia, Uruguay cuenta ahora con una superficie forestal de más de 700.000 hectáreas, siendo la exportación el destino principal de la producción. El país alcanzó de esta manera una masa crítica de plantaciones forestales que permite la conformación de polos de producción e industrialización. La balanza comercial de los productos madereros, deficitaria por décadas, arrojó finalmente un saldo positivo en los últimos cinco años, con un monto anual promedio de exportación superior a los 100 millones de dólares americanos.

El desarrollo del sector ha revelado la existencia de una gran demanda tecnológica en todas las etapas de la cadena de la madera y para sus diferentes productos madereros (energía, pulpa, aserrado y debobinado). La brecha tecnológica se ha ido acentuando en los últimos años por la dinámica adquirida por el sector forestal y por las propias características de la investigación forestal, condicionada por la longitud del ciclo biológico de los árboles.

	2000	2002	2004	2006
Madera en rollo	46.24 %	42.76 %	34.82 %	29.18 %
Carbón vegetal			0.00 %	0.00 %
Astillas y partículas	0.50 %	0.66 %	20.13 %	27.35 %
Residuos de madera			0.01 %	0.10 %
Madera aserrada	9.15 %	8.71 %	11.17 %	10.14 %
Tableros de madera		0.01 %	0.01 %	5.79 %
Pulpa de madera	0.02 %		0.00 %	
Papel recuperado	1.64 %	1.48 %	0.60 %	0.56 %
Papel y cartón	42.46 %	32.46 %	19.47 %	14.43 %
Productos primarios	100.00 %	86.09 %	86.21 %	87.56 %
Productos secundarios	0.00 %	13.91 %	13.79 %	12.44 %
Total	100.00 %	100.00 %	100.00 %	100.00 %

Fuente: Dirección General Forestal, MGAP.

Cuadro 1.1: Estructura de las exportaciones del sector forestal para los años 2000-2006

Un antecedente muy vinculado al desarrollo del sector y al estudio de estos temas en el ambiente forestal es el Programa Regional de Alternativas para la Inversión Forestal (PRAIF) que se lleva a cabo en dos fases durante la década de los 90. Tiene como objetivo general "dar respuesta a una serie de interrogantes que se planteaban para los productores forestales, en particular los pequeños y medianos, y posibles inversionistas en general", [4], y en especial estudiar la prefactibilidad de dos líneas de inversión:

- el procesamiento de madera pulpable en forma de astillas para celulosa
- la producción de madera aserrada de calidad con destino a la exportación, [4].

En el cuadro 1 se muestra el peso relativo de cada destino productivo en el valor total exportado por el sector forestal entre 2000 y 2006. El valor exportado de productos forestales se triplicó en este período, produciendo además una diversificación de los destinos productivos. En el año 2000 las exportaciones se concentraban en los rubros madera en rollo y papel y cartón que en forma conjunta explican el 90 % del valor exportado. En 2006 las exportaciones se diversifican fuertemente, creciendo en el peso relativo las exportaciones de astillas y partículas, los tableros de madera y los productos secundarios (básicamente envases de cartón corrugado y distintas configuraciones de papel).

A pesar de la predominancia actual de la producción de materia prima en rollizos o trozas, se perfila una clara tendencia hacia productos diferenciados, con mayor valor agregado. La calidad industrial de la madera es un eje cada vez más central en la demanda tecnológica del sector.

Siguiendo al PRAIF ya a mediados de la década de los 90 .el análisis de los mercados internacionales indicó un consumo mundial en franca expansión de tableros de partículas y de fibras”... ”y la madera rolliza pulpable de *Eucalyptus* constituye una buena materia prima para la elaboración de estos productos”, [4]. En este sentido, ”convendría generar y acumular información en el país sobre la respuesta de las especies seleccionadas de *Eucalyptus* a las prácticas de manejo [silvicultural]”, [4].

La importancia creciente del sector en la economía hace fundamental su estudio experimental, para lograr una mayor eficiencia y eficacia en la producción de madera. En este contexto, el objeto de estudio del presente trabajo está asociado a la obtención de resultados locales en la producción de madera de calidad. En este documento se procura aportar resultados experimentales que permitan identificar tecnologías productivas para mejorar la calidad de la madera.

El documento está estructurado en siete capítulos y un anexo estadístico. El capítulo siguiente describe en forma detallada los objetivos del experimento Ríos 2000 de la empresa forestal COLONVADE, así como los objetivos particulares de este documento. Los capítulos 3 y 4 brindan el marco teórico del trabajo desde los puntos de vista forestal y estadístico, respectivamente. En el capítulo 5 se describen las características del ensayo y los registros dendrométricos que surgen del mismo. En el capítulo seis se muestran los resultados de los modelos estadísticos ajustados. Por último, se realiza una síntesis y resumen de conclusiones en el séptimo capítulo.

CAPÍTULO 2

Objetivos

Este capítulo describe los objetivos perseguidos en esta investigación y concreta esos objetivos en lo que configuran las preguntas que guían a la investigación.

2.1

Objetivo general

La consecución de productos de calidad para mejorar el resultado económico-financiero en la actividad forestal es un objetivo de suma importancia para aquellos productores que quieren ampliar el espectro de productos comerciales y disminuir la vulnerabilidad ante los avatares de los precios internacionales de los productos maderables de baja calidad.

Los productos de la actividad forestal en el país han sido tradicionalmente trozas de pequeñas dimensiones, con pobre aptitud de uso industrial por los defectos anatómicos en la madera y de escaso valor agregado, utilizadas para pastas celulósicas, para combustible o como postes. En cambio, en la actualidad, la producción se destina principalmente al mercado externo, donde los niveles de precios obtenidos por estas categorías difieren en forma importante de productos de mayor tamaño y calidad, como las trozas aptas para aserrío o debobinado y las columnas [4].

Para obtener madera de calidad, esto es madera para la generación de productos de gran valor agregado, es necesario lograr trozas de gran volumen y alta proporción de madera libre de defectos o madera *clear*.

En ausencia de tratamiento silvícola que controle la tasa de crecimiento individual y las relaciones de competencia entre árboles, una plantación tendrá amplia variabilidad en clases diamétricas. También afectan en forma negativa una alta frecuencia de nudos y defectos anatómicos asociados en la madera, [4].

En lo que respecta al primer aspecto se puede constatar, en rodales coetáneos, que los árboles presentan una gran diversidad de formas y dimensiones, lo que degrada o invalida el volumen cosechado como materia prima para algunos usos. Por ejemplo, sólo la porción basal de un número restringido de árboles del rodal tendrá tamaño suficiente para aserrío y debobinado; dentro de los restantes árboles, no todos tendrán la rectitud y conicidad que exige el mercado de postes y columnas y entonces, un alto porcentaje del volumen se deberá destinar a los usos menos redituables. Por otro lado, la presencia de defectos es especialmente relevante en la producción de tablas aserradas o láminas, ya que defectos tales como nudos en las trozas suelen producir huecos en los productos finales, lo que disminuye su calidad.

Para obtener madera de calidad es necesario intervenir en el crecimiento de los árboles, controlando los factores mencionados. El conjunto de técnicas y procedimientos que involucran a las diferentes formas de intervención en una población forestal es denominado tratamiento silvícola.

Si bien no es mucha la experiencia mundial en tratamiento silvícola enfocado a la obtención de alta calidad, se ha demostrado la eficacia de diferentes regímenes silvícolas en el control de la tasa de crecimiento en volumen y en la obtención de productos maderables libres de defectos. La demanda creciente por estos productos ha llevado a las empresas forestales a desarrollar sistemas silvícolas que permiten la producción de volúmenes maderables con niveles confiables de calidad. A modo de ejemplo, en Sudáfrica se han llevado a cabo experimentos de los cuales se obtuvo evidencia del efecto favorable de los raleos sobre el diámetro del fuste en especies exóticas de rápido crecimiento. El raleo consiste en la corta de una proporción de los árboles, con la consiguiente reducción en la densidad de población, [4].

La investigación experimental en tratamientos silvícolas no es muy amplia a nivel nacional. Es importante destacar que no es posible extrapolar resultados de otros países al nuestro, dada el complejo conjunto de factores ambientales que afectan el crecimiento, en particular la relación sitio-especie. Surge de este punto la importancia de obtener información local sobre las especies que intervienen en la producción nacional.

En Uruguay la mayor superficie forestada bajo proyecto corresponde al género *Eucalyptus*. Entre las especies de este género cultivadas en nuestro país predomina *Eucalyptus grandis*. Si bien la especie es autóctona de la costa Australiana, presenta una alta adaptabilidad a sitios uruguayos, así como excelentes tasas de crecimiento.

La empresa forestal COLONVADE S.A. instaló en 2000 un ensayo con el objetivo de obtener datos experimentales sobre diferentes alternativas de manejos silviculturales en *Eucalyptus grandis* que llamó Ensayo Ríos 2000.

El Ensayo Ríos es concebido para arrojar luz sobre las alternativas en tratamiento silvícola en plantaciones de la especie creciendo sobre suelos predominantes en Rivera, donde se encuentra la mayor población de *Eucalyptus grandis* del país plantada bajo proyecto. En

el Ensayo Ríos, la empresa COLONVADE fijó como objetivos[3]:

- Evaluar los efectos de la poda y el raleo sobre variables dendrométricas.
- Comparar la calidad de la madera de los tratamientos mencionados, en cuanto a proporción de leño conteniendo defectos y a propiedades físico-mecánicas.
- Evaluar la interacción de los tratamientos con la incidencia de agentes perjudiciales bióticos (microorganismos patógenos, insectos plaga) o abióticos (viento).

En 2006 no es posible dar aún respuesta a estas preguntas, entre otras razones, porque algunos aspectos considerados en los objetivos no pueden ser medidos hasta lograr la cosecha final que se realiza al finalizar el ciclo productivo. Por ejemplo, no es posible medir el porcentaje de trozas con defectos hasta obtener las trozas. Sin embargo, se puede tener mediciones de otras variables relacionadas con el desarrollo de los árboles en los primeros seis años de crecimiento.

El Departamento de Producción Forestal y Tecnología de la Madera de la Facultad de Agronomía evalúa los resultados del experimento hasta el año 2006, a través del trabajo final (Tesis de grado) de dos estudiantes. El autor de este trabajo colaboró en el análisis estadístico de los datos, tarea que constituye la base para la elaboración del presente Informe Final de Pasantía.

El objetivo de este trabajo es aportar resultados parciales a los objetivos del ensayo. Las preguntas que guiarán el análisis de los datos son

¿Influye el manejo silvicultural en la calidad de la madera de *Eucalyptus grandis* en Rivera?

Si hay influencia, ¿cuál es la alternativa de manejo silvicultural que produce mayor incremento en *Eucalyptus grandis* en sitios de Rivera durante los primeros seis años de crecimiento de la plantación?

Estas preguntas determinan el objetivo específico de este trabajo, que es la obtención de un modelo de análisis para los registros que se efectuaron en el Ensayo Ríos 2000 en el año 2006. En base a este modelo se intenta determinar si alguno de los tratamientos probados en el experimento está asociado a la obtención de un mayor volumen de madera.

La obtención de madera de calidad estará vinculada únicamente a los registros con los que se cuente. Si bien ninguna variable evaluada se relaciona con estimaciones de volumen de madera *clear*, el tamaño de las trozas afecta su aptitud de uso.

En particular se destaca que no será considerado el vector económico en la determinación de la alternativa de tratamiento silvícola para la obtención de madera de calidad. Los

tratamientos silvícolas implican muchas veces costos en los que se debe incurrir en el presente para, eventualmente, obtener mayores beneficios en el futuro. Existen algunos trabajos que mediante análisis de sensibilidad en los precios futuros de la madera de calidad y la tasa de descuento intertemporal dan aproximaciones a estos problemas, [7].

Los próximos dos capítulos darán los fundamentos para la construcción de dicho modelo, tanto desde la perspectiva forestal como desde la perspectiva estadística.

CAPÍTULO 3

Marco teórico forestal

En este capítulo se resumirán los principales aspectos relacionados con el crecimiento de los árboles y cómo distintas intervenciones, llamadas tratamientos silvícolas, pueden afectar el desarrollo de los mismos.

En primer lugar, se realiza una descripción muy sintética de los principales elementos que tienen incidencia en las etapas de crecimiento y desarrollo del árbol, tanto cuando se lo considera en forma aislada como cuando se tiene en cuenta la interacción con el resto de los árboles de la población.

Más adelante se describen las técnicas silvícolas que se utilizan para incidir en algunos de los factores naturales, con particular atención a aquellas empleadas en el experimento que se estudia en este trabajo. Por último, se consideran qué características de los árboles son relevantes a los efectos de obtener un máximo valor comercial en el mercado.

3.1

Elementos naturales que inciden en el crecimiento y desarrollo de los árboles

La *fotosíntesis* es el proceso por medio del cual se producen carbohidratos a partir de materias inorgánicas, mediante la transformación de la energía solar en energía química. Es el principal proceso que determina el crecimiento y desarrollo de las plantas verdes, y de él depende la supervivencia del individuo. Los árboles son seres autotrófos, esto quiere decir que generan su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas simples. Las hojas son el principal órgano del árbol donde se realiza la fotosíntesis. Los nutrientes y el agua fluyen hacia las hojas como savia bruta ascendente. Luego del proceso de fotosíntesis, una dilución de compuestos conocidos como savia elaborada desciende para nutrir a todos los tejidos gracias al sistema vascular.

La copa de un árbol es una estructura compleja, compuesta de follaje de una gran variedad de edades diferentes. Cada hoja desarrolla la fotosíntesis a una tasa que refleja su condición fisiológica, dependiente de su edad y posición en la copa. La manera en que los fotosintatos son generados por cada árbol determina la forma en que éste se desarrolla y la forma en que interactúa con el resto de los árboles de su entorno.

Se establecen dos procesos de competencia por la captación de energía solar. Uno se da entre las distintas ramas de un árbol y el otro entre el árbol en cuestión e individuos adyacentes. Los procesos de crecimiento y desarrollo del árbol dependen de su capacidad de exploración del espacio para lograr mayor generación de fotoasimilados. Esta mayor exploración se alcanza mediante la ramificación de su estructura aérea. La interacción del árbol con el medio es la que a la larga termina estableciendo la estrategia de crecimiento de cada árbol. Al evaluar la eficiencia relativa de la fotosíntesis en hojas expuestas a pleno sol y hojas a la sombra, se constatan grandes diferencias, que permiten explicar en gran medida las diferencias observadas en eficiencia fotosintética entre árboles que ocupan diferentes posiciones en el nivel general de copas de la plantación, conocido como el *dosel*.

La relación que existe entre la capacidad fotosintética y el índice de área foliar (que vincula superficie de hoja con unidad de área del suelo) es muy importante, puesto que el silvicultor puede controlar el área foliar de los árboles individuales mediante el raleo y la poda. Así pues, la capacidad total del crecimiento de cada árbol se puede aumentar o disminuir según el espacio que se deje entre ellos. El espaciamiento promedio será mayor con un mayor número de raleos más frecuentes, de mayor severidad; el espaciamiento medio será menor con menos raleos a intervalos más prolongados y menor severidad. El volumen de copas será directamente proporcional a la relación entre espaciamiento y tamaño promedio de los árboles.

Cada árbol en una plantación compite con sus vecinos más próximos por agua y nutrientes del suelo y por radiación solar y dióxido de Carbono de la atmósfera. Si el número de árboles por unidad de superficie es muy alto, la competencia entre ellos tiene efectos negativos sobre el crecimiento, pues se reduce la cantidad de agua y nutrientes disponibles para cada individuo y lo mismo sucede con la superficie expuesta a luz solar. Como consecuencia, el crecimiento promedio individual será muy bajo y la proporción de árboles que no sobrevivan muy alta.

Por otro lado, también ocurre competencia entre las ramas de un mismo árbol. A medida que el árbol crece en altura y desarrolla el volumen de su copa, las ramas viejas pierden vigor, porque quedan debajo de otras ramas nuevas que reciben radiación solar directa. El follaje sombreado tiene una tasa fotosintética muy baja, por lo que no aporta a la generación de compuestos asimilables y son finalmente desechadas por el árbol. Como consecuencia ocurre un proceso de caída natural de ramas muertas.

El proceso de competencia y mortalidad natural de poblaciones coetáneas se ve afectado por la composición en especies, la productividad del sitio y la densidad inicial. En general las especies cuyas necesidades ecológicas las caracterizan como intolerantes a la sombra

tienen rápido crecimiento y entran en estados de competencia y diferenciación marcada en el tamaño de los árboles. En estas especies, a diferencia de aquellas tolerantes a la sombra, se dan importantes reducciones en el crecimiento individual y aún poblacional, a menudo acompañado de una tasa de mortalidad relativamente alta cuando existen altas densidades de población y niveles elevados de competencia. A igualdad de especie, las poblaciones que crecen sobre sitios de mayor productividad entrarán más temprano en la fase de competencia y mortalidad. A su vez, con igual especie y productividad de sitio, la competencia será más temprana, la diferenciación en tamaños individuales mayor y la mortalidad potencial más alta cuanto mayor sea la densidad de población inicial.

En síntesis, existe un conjunto de fuentes de variación natural muy diverso, que incluyen la genética de cada árbol, su estrategia de crecimiento y su interacción con el medio, lo que configura un problema para transformar los árboles en productos maderables de calidad.

Las ramas que ya no son útiles para el árbol se desprenden, produciendo una herida en el tejido leñoso que con el tiempo deberá cicatrizar. En ausencia de intervención humana, el proceso de desrame natural es lento y supone la inclusión de tejido muerto, corteza, secreciones y otras anomalías histológicas en el tronco del árbol. Cuanto mayor sea la edad y el grosor de la rama muerta, mayor será el volumen leñoso en el fuste afectado por tejidos diferenciados. Por lo tanto, el silvicultor aplica el tratamiento de poda con la intención de acelerar este proceso, controlando así la proporción de material leñoso dentro de los rollizos cosechados que se encuentra afectada por nudos y otros defectos anatómicos asociados a las ramas.

3.2

Tratamiento silvícola

El beneficio de un emprendimiento forestal está ligado con los productos que se quieren obtener del monte. Si el objetivo es extraer madera para combustible, se querrá extraer el mayor volumen posible por unidad de superficie sin tener en cuenta los defectos que pueda tener la madera. Por otro lado, si el objetivo es industrializar la madera para, por ejemplo la fabricación de muebles, se querrá obtener madera de calidad, esto es, madera libre de defectos.

Muchos de los factores que inciden en la gran variabilidad natural que presenta un monte pueden ser controlados, o al menos atenuados, para lograr árboles uniformes, de los que se pueda extraer mayor provecho.

En la producción forestal controlada por el hombre, se denomina tratamiento silvícola al conjunto de prácticas que se aplican a través de todas las fases por las que pasan el árbol y la población forestal, desde la germinación de la semilla, la cría en vivero, la plantación a campo, las intervenciones a las que es sometida la población durante su desarrollo y la forma en que se extrae el árbol del monte, con el objetivo de controlar crecimiento y

calidad de la producción de madera.

Las decisiones silvícolas se inician ya desde la primera fase de desarrollo del árbol, de semilla a plántula (reproducción sexuada) o de propágulo a plántula (reproducción vegetativa o clonal). La selección de semillas que serán sembradas directamente en envases o en almácigos permite descartar aquellas semillas que darán lugar a plantas débiles o de mal estado sanitario. Algo similar sucede cuando se utiliza la propagación vegetativa como técnica de obtención de plántulas; inmediatamente después de su enraizado, se descartan individuos malformados, con desarrollo radicular insatisfactorio, con síntomas de deficiencias en nutrientes, etc.

La fase de desarrollo en vivero puede variar en nuestro país según las especies, pero en general este período dura entre tres y nueve meses para los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. En este lapso se seleccionan sólo individuos aptos para continuar cultivando. Se procura dar a las plántulas en germinación una protección durante su crecimiento inicial, principalmente de la desecación, el daño mecánico por viento y la incidencia de enemigos naturales y predadores (aves, insectos, microorganismos patógenos) por un lado y suministrar agua y nutrientes suficientes como para que crezca hasta lograr unas especificaciones de calidad, asociadas a su probabilidad de supervivencia en las condiciones de plantación. Es corriente que en los viveros se aplique riego por aspersión y fertirriego (aspersión con soluciones de nutrientes), prácticas menos frecuentes en plantación, donde la plántula debe depender de su capacidad de competir y captar factores de crecimiento para su supervivencia.

En esta instancia, se debe tener en cuenta el desarrollo del tallo, así como el desarrollo radicular y una adecuada proporción parte aérea - parte radicular. Es probable que un árbol con escaso desarrollo de raíces no pueda absorber agua y nutrientes en cantidades suficientes para suplir sus necesidades fisiológicas. También es probable que no arraigue correctamente, con lo que no estará asegurado el anclaje del fuste y la copa al suelo, por lo que dicho individuo será eventualmente derribado por la acción del viento.

Luego de superada la germinación y el desarrollo inicial, los plantines deberán pasar por un período de rusticación en vivero, para que puedan sobrevivir en el sitio de plantación, donde el ambiente será menos controlable y potencialmente adverso. Antes de su expedición, se seleccionan los plantines que serán llevados a campo, descartando el resto por razones de sanidad, de vigor y crecimiento y/o de conformación.

La preparación del sitio y la plantación son etapas de suma importancia; un plantín mal establecido, evolucionará a un árbol mal formado. Entre los aspectos a considerar se encuentra el espaciamiento medio (que corresponde a determinada densidad de población, en términos de número de árboles por unidad de superficie) y el patrón de distribución de los árboles (en marco real, rectángulo, tresbolillo, quince, filas dobles, etc.). En plantaciones obtenidas partir de semillas (i.e. no clonales), es habitual que la densidad inicial sea relativamente alta; en la medida que los árboles crecen y sus necesidades en nutrientes, agua y radiación solar aumentan, la densidad podrá ser reducida, con el propósito de conservar un menor número de individuos vigorosos, sanos y con una configuración acorde

a los objetivos productivos. Una alta densidad inicial es necesaria por un lado para mejorar la forma del conjunto de los árboles, evitando el desarrollo de copas amplias, ramas gruesas y fustes cónicos y por otro, a los efectos de contar con una cierta diversidad de la cual elegir en cada etapa de corta qué conjunto selecto se continuará cultivando hasta la siguiente cosecha parcial y hasta la corta final.

En general, se entiende por forma o configuración al conjunto de caracteres cualitativos que afectan de una manera u otra la calidad de la madera que produce el individuo. Estos caracteres incluyen a) *brote apical* único y recto, sin bifurcaciones u horquetas; b) *rectitud de tronco o fuste*, es decir libre de torcedura basal u ondulación; c) *verticalidad*, es decir que el tallo no está inclinado; d) *hábito de ramas*, que comprende el *ángulo de inserción* respecto al fuste principal, *grosor de las ramas*, *caída natural* y en ciertos casos *longitud de ramas*.

Otros aspectos cualitativos se relacionan con el vigor del árbol o del rebrote y se refieren a clase de copa, *i.e.* la posición relativa de cada individuo dentro del dosel de copas. Según la clasificación de Kraft (1884), los árboles de un rodal coetáneo pueden diferenciarse en dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos, en orden decreciente de vigor, capacidad competitiva y desarrollo de copa dentro del dosel principal.

El *régimen silvícola* de las principales especies de rápido crecimiento cultivadas en Uruguay con fines industriales (*Eucalyptus grandis*, *E. globulus*, *E. maidenii*, *E. dunnii*, *E. viminalis*, *Pinus taeda* y *P. elliottii*), varía en sus componentes, su duración y complejidad según los productos a obtener. El régimen silvícola consiste en un programa de tratamiento planificado, que abarca toda la vida de la plantación. En nuestro medio, como en todos los países que practican silvicultura de plantaciones, este régimen incluye las fases que se describen brevemente a continuación

1. La preparación del sitio, que incluye la limpieza del suelo, la eliminación de vegetación indeseable, los laboreos primario y secundario del suelo, la pre-plantación, con agregado de herbicidas y/o fertilizantes y el control de plagas.
2. La plantación, que comprende las operaciones de vivero, a los efectos de lograr el tipo y calidad del material necesarios, los métodos y calendario de plantación y el patrón de espaciamiento previsto.
3. Los cuidados iniciales, incluyendo las carpidas post-plantación, la remoción de vegetación competitiva o la limpieza y la aplicación de fertilizantes y/o herbicidas.
4. La fase de podas, donde fuera necesaria o aplicable, que supone la ejecución de una o más operaciones, el número de árboles a podar por unidad de superficie y la severidad de cada una de estas operaciones.
5. La etapa de otras cortas intermedias, especialmente raleos, cuya prescripción comprende definir la naturaleza del régimen de raleos (métodos, momentos de ejecución, severidad - peso e intensidad)

6. Una corta final u operación de tala rasa, durante la cual la cosecha debe controlarse, a los efectos de mantener la productividad del sitio, evitando procesos erosivos, compactación y pérdida de fertilidad del suelo.

El *raleo* consiste en reducir el número de árboles por unidad de superficie de una plantación en crecimiento. Al disminuir la densidad de plantación, se logra una menor competencia entre los árboles, y por ende, mayor volumen por árbol. Esta ganancia es a costa de un menor número de árboles por unidad de superficie, por lo que se produce una puja entre el volumen total que se obtiene por unidad de superficie y el volumen individual de cada árbol. Se debe tener en cuenta que un monte excesivamente raleado permite un mayor pasaje del viento, produciendo mayor riesgo de quiebres en cada árbol. Las plantaciones forestales suelen comenzar con densidades de plantación superiores a 1000 árboles por hectárea.

Un régimen de raleos comprende aspectos como la edad de aplicación del primer raleo, el orden de prioridades que se asigna a las diferentes clases de copa (método o tipo de raleo), el intervalo entre sucesivas operaciones de raleo, el peso o intensidad de raleo y la severidad del régimen, comúnmente expresada como la proporción del volumen cosechado hasta la corta final que se retira bajo la forma de raleos.

Como subproducto de los raleos se obtiene madera de escaso valor comercial, que puede ser destinada a usos donde el tamaño de las trozas no es importante. Estos usos incluyen la producción de astillas conocidas como *chips* para tableros de partículas o para la fabricación de pastas celulósicas, la producción de tableros de fibras, o bien como madera para combustible (leña, carbón vegetal, obtención de alcoholes). La obtención de madera de calidad, generalmente asociado a aserrío y debobinado (que luego será destinado a tableros compensados), se refiere a la porción basal del fuste de los árboles extraídos en la cosecha final, esto es, la producción obtenida al finalizar el período productivo.

La *poda* es el procedimiento de eliminar ramas de un árbol. Toda *poda* implica una herida que el árbol tendrá que cicatrizar. El árbol naturalmente pierde las ramas más bajas ya que no le sirven para capturar luz y le provocan un peso adicional que debe mantener el tronco. Al desprenderse una rama se produce una herida que deja marcas en el tronco que reducen el valor comercial del mismo, por lo que la calidad de la madera se ve afectada en forma negativa. La *poda* se utiliza para intervenir intencionalmente en este proceso para reducir las imperfecciones que dejan las heridas.

Al podar se disminuye el área fotosintética del árbol pudiendo hacer mermar su producción de alimento y afectar su correcto desarrollo. Si la *poda* se realiza en ramas superfluas, la capacidad de sintetizar alimento no se sentirá afectada. En la misma línea, si la *poda* es realizada en fases tempranas del crecimiento y se realiza en forma correcta, el proceso de cicatrización generará mejores resultados, aumentando el volumen de madera de calidad del árbol.

Algunos aspectos que deben ser tomados en cuenta son el tipo de herramientas a utilizar,

la longitud del muñón remanente y el momento del año, para evitar que el árbol contraiga infecciones o que se generen defectos adicionales como consecuencia de la poda.

La aplicación de un régimen de podas no es viable sin un régimen de raleos apropiado. Se procura obtener de los árboles una alta proporción de madera sin defectos y a la vez un alto volumen de producción. Un rodal podado pero no raleado producirá muchos árboles con pocas imperfecciones pero el volumen y el diámetro individual de los fustes será menor debido a la alta competencia. A la vez, un monte raleado sin podas generará árboles voluminosos, de copas extendidas y fustes cónicos, que producirán un gran porcentaje de madera con imperfecciones, con bajo rendimiento en los procesos industriales, lo que reduce el desempeño comercial de la plantación.

En el sistema silvícola, los regímenes de poda y raleo deben ser planificados de manera coordinada, a los efectos de lograr una óptima interacción. Desde el punto de vista operativo, por ejemplo, es frecuente que la primera poda anteceda al primer raleo, para mejorar visibilidad y acceso dentro de la plantación. Sin embargo, sería ineficiente podar aquellos individuos que serán luego raleados. Raleo y poda afectan la forma del fuste; la reducción de la densidad tiende a crear fustes más cónicos en tanto que la extracción de una parte de la copa viva tiende a que los fustes se vuelvan más cilíndricos. En conjunto, las podas deberán aplicarse temprano en el ciclo de la plantación, para dar tiempo a que se forme madera libre de defectos, que será cosechada en los últimos raleos y la corta final. A grandes rasgos, puede decirse que el ciclo de poda abarca el primer tercio de la vida de la plantación, en tanto que el ciclo de raleos comprende los primeros dos tercios. Más allá de estos períodos, uno y otro tratamiento pueden resultar inoportunamente tardíos y lo que es peor, financieramente ruinosos.

3.3

Madera de calidad

Para poder entender la relevancia de obtener madera de calidad es necesario comprender cómo se obtienen productos de valor agregado en la etapa industrial. En esta sección se describe uno de los productos de interés en la fase industrial, el tablero contrachapado y a partir de allí se explica la relevancia de la madera de calidad.

La figura 3.1 muestra un tablero contrachapado. Este tablero se obtiene aplicando un proceso industrial a la superposición de chapas o láminas de madera es un espesor aproximado de entre 1-3 mm. Las láminas se obtienen mediante debobinado o faqueado, que se hacen girar sobre una gruesa cuchilla afilada, desdoblado el volumen del tallo en una chapa o bien son cortadas por una cuchilla que opera en sentido longitudinal. El ancho de esta lámina dependerá del largo de las trozas; esta dimensión se vincula al tramo de fuste podado en cada etapa. Por otra parte, las trozas aptas para debobinado deberán tener un diámetro menor de unos 35 cm o más. Cuanto mayor sea el diámetro de la troza y la proporción de madera sin defectos dentro de ella, mayor será la eficiencia en el

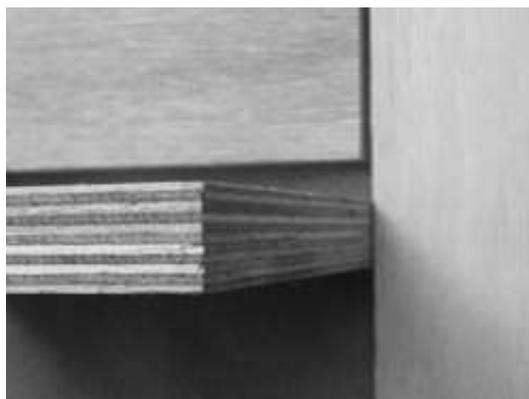


Figura 3.1: Tablero contrachapado

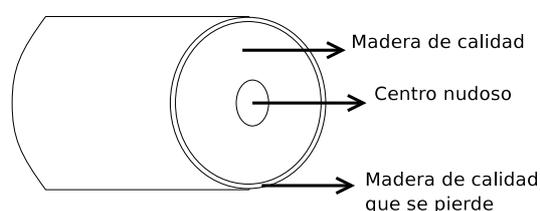


Figura 3.2: Esquema del tronco de un árbol

aprovechamiento del volumen comercial en la plantación.

Estas trozas no deben contener defectos ya que la chapa que se obtiene es muy delgada, y si existiera un nudo u otro defecto en la madera probablemente este provoque un hueco en la chapa. Si bien la chapa con el hueco puede tener aún algún valor, dado que se puede cortar y ensamblar con otras, el costo de aprovecharla es mayor respecto a la misma dimensión de lámina continua libre de defectos.

Como uno de las dimensiones del producto final está dada, la longitud de la troza, el objetivo del tratamiento forestal debe ser extraer la mayor cantidad de trozas del fuste del árbol con la menor cantidad de defectos posibles. Por otro lado no toda la madera que produce el árbol es aprovechada. En la figura 3.3 extraída de [7] se muestra un esquema de un corte transversal del tronco del árbol en el que se pueden apreciar tres zonas, la central que está compuesta por el cilindro central nudoso del árbol, que contiene la médula y el leño juvenil, con aptitud de uso diferente y la fracción periférica, que es leño adulto, madera de alta calidad si estuviera libre de defectos.

El cilindro central nudoso que está compuesto por el fuste joven del árbol que fue podado en forma temprana y por lo tanto debió cicatrizar las heridas. Todo crecimiento posterior a la cicatrización de estas heridas constituye la madera de calidad, conocida como *clear*. Si se intentara obtener láminas del centro nudoso es muy probable que se encuentren zonas con color diferenciado que corresponden a los tejidos cicatrización de las heridas

provocadas con la poda, cuando se podan ramas vivas. La poda de ramas muertas produce nudos sueltos, que normalmente se contraen y desprenden de la lámina. En otros productos valiosos, como las tablas, generan zonas de debilidad o aún huecos.

En resumen, se han mostrado aspectos sobre los que se puede incidir en la producción de madera de forma de generar mayor volumen de producción y mayor calidad de la materia prima. Se ha comentado asimismo que la combinación de algunos tratamientos producen sinergias operativas que potencian los resultados que los tratamientos pueden alcanzar al considerarlos individualmente.

CAPÍTULO 4

Marco teórico estadístico

A lo largo de este capítulo se desarrollarán los principales conceptos estadísticos utilizados para el análisis de los datos del Ensayo Ríos. Primero se muestran modelos asociados al Diseño Estadístico de Experimentos (DEE), ya que así fue concebido el ensayo. Luego se muestra el paralelismo entre el concepto de DEE y el de Modelo Lineal. En este último marco se muestran los procedimientos para estimar el modelo, y validarlo. Por último se comparan algunos procedimientos de comparación múltiples de media, ya que es el instrumento que se utilizará para determinar la alternativa óptima de raleo-poda para los modelos elegidos.

4.1

Diseño Estadístico de Experimentos

Un *experimento* puede ser pensado como una prueba que se realiza sobre un proceso o fenómeno en donde intervienen un conjunto de insumos o variables de entrada y como resultado se obtiene una variable de salida. La figura 4.1 extraída de [13] esquematiza un proceso genérico.

El proceso es un fenómeno multidimensional, en el que varios aspectos influyen sobre la transformación de los elementos de entrada para generar el producto de salida. Algunos de estos aspectos pueden ser controlados por el experimentador mientras que otros no. El objetivo final del estudio es conocer cuáles de los aspectos considerados tienen incidencia en el proceso (y por lo tanto en la salida) y si es así cuantificar el impacto.

Para estudiar el proceso se realiza una simplificación de los factores que inciden en el mismo a los aspectos relevantes ya que la realidad en la que se encuentra el experimento es esencialmente vasta y da lugar a la existencia de una infinidad de factores que pueden afectar el proceso. En dicha simplificación, el experimentador en base a su conocimiento

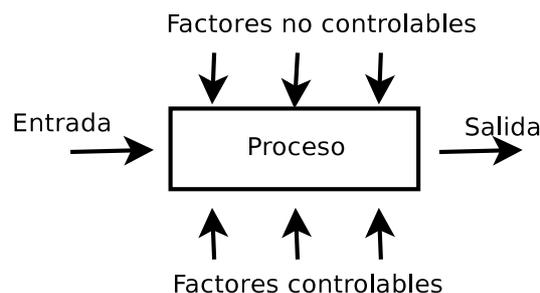


Figura 4.1: Diagrama de un proceso

considera los aspectos que tienen una importancia mayor, y deja un conjunto residual de aspectos. Se realiza el supuesto de que el conjunto de aspectos residuales está compuesto por elementos cada uno de muy escaso impacto sobre el proceso final. Por lo tanto el resultado del proceso para cada unidad de insumo participante puede resultar en un producto final distinto a pesar de utilizar unidades de insumo similares. Esto último puede ser pensado como un error de medición del producto final. En general los métodos estadísticos son una aproximación científica para estudiar mediciones sujetas a error. Se habla entonces de *Diseño Estadístico de Experimentos* (DEE) a los experimentos que son planificados y llevados a cabo para obtener resultados que serán analizados mediante técnicas estadísticas.

4.1.1. Principios de DEE El DEE descansa sobre tres pilares básicos, que generan el soporte sobre el que se construye las técnicas de análisis. Los tres principios son la *replicabilidad*, la *aleatorización* y el *bloqueo*.

El primero, la *replicabilidad*, consiste en estudiar al menos dos unidades de insumo similares bajo las mismas condiciones controladas del proceso. De esta forma es posible obtener una medida del error experimental, ya que el proceso no produce exactamente el mismo resultado para unidades similares. Sin la replicabilidad no se podría distinguir, al observar un resultado en el proceso, si la causa de ese resultado es la unidad de experimentación o el proceso que se le aplicó a esa unidad.

La aleatorización es el procedimiento mediante el cual se asignan a las diferentes unidades de estudio los aspectos que son estudiados en el proceso. La aleatorización permite tener un salvaguardo de posibles sesgos que sean introducidos por el experimentador en la elección de las unidades de estudio.

Por último el bloqueo consiste en realizar un control de aquellos aspectos que puedan generar confusión en el resultado del proceso. Esto es, controlar que no existan factores que puedan estar asociados a la observación de resultados que estén explicados por tales factores y no por los de estudio.

4.1.2. Alguna definiciones En el DEE se denominan *factores* a los aspectos que influyen sobre el proceso. Los factores pueden ser controlados, cuando el experimentador tiene un rol activo sobre ellos y es él quien determina si se aplica tal o cual factor; o pueden ser no controlados, como lo son el conjunto de aspectos residuales. Además los factores controlados pueden ser de interés o no para la investigación, los de interés son aquellos sobre los que se quiere realizar inferencias, mientras que los que no son de interés están asociadas al control local o bloqueo, si no fueran considerados no se estaría cumpliendo con el tercer principio del DEE.

Se denomina *nivel* a cada una de las intensidades probadas de los factores, y *tratamiento* a la combinación de los diferentes niveles de cada factor.

A cada objeto o sujeto sobre el cual se aplica un tratamiento se lo denomina *unidad experimental*, es la mínima unidad de análisis. Cuando las unidades experimentales consisten en material heterogéneo se las suele agrupar en *bloques*.

Luego de aplicar los tratamientos a las unidades experimentales el experimento devuelve una medida en una variable de interés que es cuantitativa y se denomina *variable de respuesta*.

El elemento clave del análisis estadístico es la variabilidad que presenta la variable de respuesta, y cómo la misma puede ser descompuesta en diversas fuentes. Se llama variación total a la variabilidad que presenta el fenómeno estudiado en el proceso, que se divide en dos fuentes. Por un lado la primer fuente de variabilidad es la atribuida a los factores en estudio controlados, ya sean de interés o no. Por último, la segunda fuente tiene su origen en el componente residual que suele relacionarse con la variabilidad natural de las unidades experimentales.

En resumen, el *Diseño Estadístico de Experimentos* es el proceso de planificar un experimento. Esto es elegir: las unidades experimentales, los factores, las combinaciones de los mismos, asignar aleatoriamente qué tratamiento le corresponde a cada unidad, la creación o no de grupos con el fin de controlar el error experimental; para identificar las fuentes de variación del proceso estudiado, tanto las sistemáticas como las aleatorias, las planificadas como las molestas; y lograr discernir si las diferencias en los datos se producen por el azar de la muestra o por la existencia de discrepancias verdaderas entre los tratamientos.

4.1.3. Componentes del DEE Todo DEE puede ser examinado como la conjunción de tres componentes: la estructura del diseño, la estructura de los tratamientos y el esquema de aleatorización.

El primero de los componentes, la estructura del diseño, refiere a la manera de considerar las unidades experimentales, esto es si se deben agrupar las unidades experimentales o no.

Por ejemplo, en un Diseño Completamente Aleatorizado las unidades experimentales no

son agrupadas, ya que se consideran homogéneas entre sí. Cuando se asignan los tratamientos, se realiza en forma equiprobable entre todas las unidades experimentales que constituyen el experimento.

En cambio, en un Diseño en Bloques Completamente Aleatorizados, las unidades experimentales son agrupadas en bloques según factor de bloqueo, logrando grupos de unidades experimentales homogéneas entre sí al interior de cada bloque y diferentes entre los bloques. El factor de bloque en este caso es único. Se cumple además un equilibrio entre los bloques, ya que en cada bloque aparece cada tratamiento probado el mismo número de veces que en los demás tratamientos, por ello los bloques tienen el mismo número de unidades experimentales.

Otros diseños permiten incorporar más factores de bloqueo o levantar la restricción de trabajar con bloques completos.

Por otro lado, la estructura de los tratamientos tiene en cuenta el número de tratamientos a ser estudiados, los niveles que toman los mismos, y los cruzamientos entre los niveles de los distintos factores.

La estructura más simple es la de un experimento a una vía, donde existe un único factor que puede asumir distintos niveles. Cuando intervienen dos factores de interés, el diseño se dice a dos vías. Se debe tener en cuenta además de los cruzamientos de los niveles de cada factor con el otro, la posible inclusión de términos de interacción que produzcan comportamientos diferentes al de considerar únicamente los dos factores en forma individual.

La complejidad de la estructura de los tratamientos crece con el número de tratamientos, la presencia de tratamientos de control o restricciones técnicas que no permitan probar todos los cruzamientos de los factores.

Por último, es el esquema de aleatorización el que termina de definir el diseño de experimentos ya que es la forma en que se relaciona la estructura de los tratamientos con la estructura del diseño.

4.2

Algunos diseños

A continuación se presentan algunos diseños experimentales que se utilizarán para modelar los datos del Ensayo Ríos.

4.2.1. Diseño Completamente Aleatorizado a una vía En este diseño, las unidades experimentales del experimento son consideradas como homogéneas, y se quiere probar el efecto de un sólo factor sobre el proceso de estudio. Esto es, la estructura del diseño y la estructura de los tratamientos son las más simples posibles. El esquema de aleatorización es completamente aleatorio, por lo que todas las unidades tienen la misma probabilidad de que se les sea asignado un factor dado.

Si el factor en estudio presenta t niveles y t son los tratamientos que se quieren probar; y cada tratamiento es probado en r unidades, o sea es replicado r veces¹, el número total de unidades experimentales es $n = rt$.

Un modelo lineal para este diseño es de la forma:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, t, \forall j = 1, \dots, r$$

donde y_{ij} es una variable aleatoria que mide la respuesta de la j -ésima unidad a la que se le aplica el tratamiento i , los ϵ_{ij} son variables aleatorias que representan el error experimental, se asume que son idénticamente distribuidas $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, y que son independientes.

Como $E(y_{ij}) = \mu + \tau_i \quad \forall i, j$, se puede interpretar el valor de μ como una media general a todas las unidades experimentales y el valor de τ_i como un efecto particular del tratamiento i sobre el valor promedio.

El modelo estadístico puede ser pensado como un conjunto de t muestras aleatorias de tamaño r que pueden provenir o no de diferentes distribuciones normales, todas con igual parámetro de escala. El objetivo es inferir sobre el valor medio de cada distribución normal, y encontrar cuáles de las muestras provienen de poblaciones distintas.

En términos prácticos, los diferentes niveles medios implican efectos diferenciales de un tratamiento respecto de los restantes. En el trabajo de base, estos tratamietos serán diferentes manejos de raleo-poda, y se querrá examinar si existen diferencias significativas con respecto a algún atributo de calidad.

4.2.2. Diseño en Bloques Completamente Aleatorizado a una vía Considerando la misma estructura de tratamientos que en el caso anterior, y una estructura de diseño formada por grupos de observaciones, dentro de los cuales el esquema de aleatorización es completamente al azar, se obtiene el Diseño en Bloques Completos al Azar.

El objetivo de la agrupación de las unidades es reducir la variabilidad que pueden presentar las mismas. Si el material experimental no es homogéneo pero puede ser agrupado en

¹Los diseños que presentan igual número de réplica para cada tratamiento se llaman balanceados: Logran estimar los diferentes efectos con la misma precisión, justamente por tener el mismo número de datos para estimarlos.

bloques de material homogéneo a su interior y heterogéneo entre bloques, es posible controlar una fuente de error que, de otra manera, provocaría menor precisión en los procesos inferenciales.

La introducción de bloques provoca una restricción en el proceso de aleatorización, ya que dentro de cada bloque el diseño es completamente al azar. Los bloques utilizados son completos ya que están todos los tratamientos probados en todos los bloques.

El modelo lineal para un diseño en bloques debe agregar respecto al diseño anterior un efecto bloque, resultando de la forma:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, t, \forall j = 1, \dots, r$$

donde ahora el subíndice j indica el bloque, siendo r el número total de bloques². El valor esperado de la variable de respuesta incluye al efecto del bloque, ya que podría ser otro causante de diferenciación en los valores medios. Sin embargo este parámetro suele denominarse molesto, ya que no es de interés para realizar inferencias. El bloqueo es un método para controlar el error experimental, y está basado en el conocimiento del investigador sobre el estado del material experimental. Por esta razón, es de esperar que provoque diferencias significativas en el valor promedio de la variable de respuestas. El realizar un bloque cuando no es necesario hacerlo, puede provocar inferencia no válidas.

Los supuestos sobre la distribución de los errores no observados son los mismos que los realizados en el diseño anterior. Se agrega como supuesto al modelo la inexistencia de interacción entre bloques y tratamientos. De otro modo, se asume que los bloques no provocan una mayor o menor respuesta para algún tratamiento.

4.2.3. Diseño factorial Se suele hablar de diseños factoriales cuando se incorporan más de dos factores al análisis. Al existir varios factores es posible modelar además del efecto principal de cada factor, el efecto de la interacción entre los factores.

Para estos diseños se suele comenzar el análisis desde una especificación con todos los componentes y en forma secuencial se van retirando del modelo de análisis aquellos efectos que no son significativos.

Un diseño factorial a dos vías con interacción es de la forma:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \delta_j + \gamma_{ij} + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, t, j = 1, \dots, r$$

donde el factor de interacción es representado por δ_{ij} , los efectos principales son cuantificados por τ_i y δ_j . El diseño es una extensión del modelo a una vía puede generalizarse a

²Se está suponiendo que no hay submuestreo, esto es $n_{ij} = 1$ cualesquiera sean i, j .

un modelo multivías. Es importante considerar todas las interacciones posibles que tiene este diseño, siendo esta característica una ventaja sobre los diseños a una vía. Se pueden incorporar en los diseños factoriales elementos de bloqueo.

4.2.4. Diseños corregidos por covariables El modelo de análisis de un diseño de experimentos puede incluir términos que no son factores en estudio o factores de bloqueo. Estos términos están asociados a una capacidad para explicar el fenómeno que no es capturable mediante la estructura de tratamientos utilizada. Se suele denominar covariable cuando este elemento es introducido al análisis, el modelo para un DCA corregido por una covariable queda de la forma:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \alpha x_{ij} + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, t, j = 1, \dots, r$$

donde x_{ij} es la covariable que se encuentra en relación lineal con el valor esperado de y_{ij} mediante el parámetro α .

Se suele utilizar, para tener claridad en los resultados, covariables que no estén asociadas a los tratamientos ya que la inclusión de tales covariables podría reducir o anular el impacto de los tratamientos sobre la respuesta.

Es importante destacar que este no es en sí mismo un diseño, sino un elemento que permite obtener diseños más precisos, en el sentido de controlar el error experimental teniendo una medida cuantitativa de la heterogeneidad de las unidades experimentales.

Todos los diseños presentados pueden considerar los efectos como fijos o aleatorios. Si se trabaja con efectos fijos, el conjunto de niveles en cada factor probado son los únicos de interés. Por otro lado los efectos aleatorios se utilizan cuando los niveles de un factor son un subconjunto de los niveles de interés. Los modelos mixtos pueden contener efectos fijos y aleatorios. Por ejemplo se podrían considerar bloques aleatorios con tratamientos fijos.

4.3

Modelos Lineales

Los modelos presentados pueden ser vistos como casos particulares del modelo lineal general, que suele ser representado de la forma

$$Y = X\beta + \epsilon$$

donde Y es un vector aleatorio cuyas componentes son variables aleatorias observables, ϵ es un vector aleatorio compuesta por variables aleatorias normales independientes e idénticamente distribuidas con media cero y varianza σ^2 desconocida. Por otro lado β es

un vector de parámetros y X es una matriz cuyas columnas son variables que pueden ser aleatorias o no. Se suele denominar matriz de diseño a esta matriz. Las variables componentes de la matriz de diseño son variables que explican a Y . Se asume una forma funcional lineal que relaciona a las variables dependientes con la independiente.

Bajo los supuestos presentados, el vector de parámetros es estimado³ por $\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$, que es el mejor estimador lineal insesgado y de mínima varianza, cuya distribución es normal por ser una transformación lineal del vector Y .

En los modelos presentados las variables explicativas representan la pertenencia a algún tratamiento o a algún bloque. Por otro lado, la presencia del efecto de la media general provoca que en el modelo lineal general la matriz de diseño haya un vector de unos. Las dos características mencionadas hacen que la matriz de diseño no tenga rango completo, y por lo tanto la matriz $X'X$ es no invertible por ser singular.

En definitiva, el modelo se encuentra sobreparametrizado, y por lo tanto no es estimable.

4.3.1. Estimación Los modelos para realizar el análisis de los datos de los diferentes diseños mencionados en este capítulo se denominan modelos de rango no completo.

Los modelos de rango no completo presentan una matriz de diseño que no tiene rango completo, eso es, alguna de las columnas de la matriz de diseño es combinación lineal de las restantes. Estos modelos presentan una dificultad en la estimación mínimo cuadrático ordinaria ya que no existe una única inversa de la matriz $X'X$.

El modelo se dice sobreparametrizado ya que contiene más parámetros de los que se pueden estimar en forma única. Para solucionar este problema hay varias opciones:

1. Redefinir el modelo usando parámetros que sean únicos. Esto implica abandonar el modelo original y reducir el número de parámetros para lograr un modelo que sea estimable por mínimos cuadrados ordinarios.
2. Introducir restricciones sobre el modelo sobreparametrizado de forma de tener parámetros definidos de forma única.
3. Trabajar sobre combinaciones lineales de los parámetros en lugar de sobre los parámetros mismos, ya que las combinaciones lineales de los parámetros serán únicas y estimables. Por ejemplo se puede plantear la diferencia entre dos medias de tratamientos $\mu_i - \mu_{i'}$.

En el presente trabajo se opta por la segunda opción. Se pueden introducir diferentes restricciones lineales, las que generan diferentes estimaciones de los parámetros. Una restricción habitual es imponer que la suma de los τ_i sea nula. Utilizar esta restricción implica

³Mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios o mediante el método de máxima verosimilitud

definir los τ_i como efectos relativos o desvíos respecto al valor medio de la variable de respuesta. Otra restricción muy utilizada es imponer el valor cero a uno de los efectos. Al trabajar con esta restricción se están redefiniendo los restantes parámetros como desvíos respecto al tratamiento base. Esta restricción es especialmente útil cuando uno de los tratamientos es un testigo. En este trabajo se utiliza esta restricción que es la implementada por defecto en el software estadístico que se utiliza.

4.3.2. Diagnóstico del modelo Varios de los procedimientos (por ejemplo las pruebas de hipótesis) que son de interés para el análisis descansan sobre el cumplimiento de los supuestos. Es por esta razón que luego de estimado el modelo es necesario verificar el cumplimiento de los supuestos del modelo.

La mayoría de los supuestos se vinculan con la estructura de los residuos. Se asume explícitamente que los ϵ_i son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas según una ley de probabilidades normal con media nula y varianza desconocida aunque constante. Se debe testear independencia, normalidad y homoscedasticidad. El estudio de estos supuestos es realizado con los residuales estimados ya que los ϵ_i son variables aleatorias no observables. Para aproximarlos se calcula la diferencia entre la variable de respuesta observada y el valor predicho por el modelo de la misma, esto es

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i$$

y es descompuesto en varios estudios: el primero el de aleatorización, el de normalidad, el de homoscedasticidad y el de ausencia de autocorrelación. Cada estudio puede realizarse mediante una inspección gráfica, que permite detectar, grosso modo, grandes desvíos respecto de cada supuesto; y mediante pruebas formales que permiten decidir, asociados a un nivel de error, si existe o no evidencia para validar cada modelo.

Se empleó el test de Shapiro-Wilks para contrastar normalidad y el test de Bartlett para contrastar la homoscedasticidad de los residuos.

Por otra lado como los resultados del modelo pueden ser afectados por observaciones atípicas o por observaciones influyentes se utilizaron medidas para evaluar su presencia. Existen varias medidas que permiten cuantificar qué tanto influye una observación en las estimaciones obtenidas con el conjunto de los datos, por ejemplo observar el cambio en los coeficientes del modelo al excluir una observación.

4.3.3. Pruebas de hipótesis Una vez obtenido un modelo con diagnóstico favorable, es posible someter a prueba las hipótesis que están en la base del estudio.

Las pruebas de hipótesis de interés son lineales en los parámetros y los juegos de hipótesis pueden ser escritas de la forma:

$$H_o) C\beta = m \quad H_a) C\beta \neq m$$

con C una matriz de constantes de dimensión $q \times (k+1)$ y m un vector fila de q constantes, donde q es el número de hipótesis lineales y $k+1$ es el número de columnas de la matriz de diseño. El estadístico utilizado para esta prueba es de la forma

$$F_o = \frac{SCH_o/q}{SCRes/(n-k-1)}$$

$$SCH_o = SCRes^* - SCRes$$

donde $SCRes^*$ y $SCRes$ son las sumas de cuadrados de los residuos del modelo bajo H_o cierta y del modelo completo. Por lo tanto el numerador es el incremento de la suma de cuadrados de los residuos entre el modelo completo y el modelo restringido dividido por el número de restricciones impuestas. El denominador es el cuadrado medio del error que puede ser visto como una estimación de la variabilidad natural de las unidades experimentales. Bajo los supuestos de normalidad se demuestra que si la hipótesis nula es cierta el estadístico $F_o \sim F(q, n-k-1)$.

Una prueba de hipótesis de particular interés es la de significación conjunta del modelo. Dicha prueba tiene por hipótesis nula $H_o) \beta_i = 0$ con $i = 1, \dots, k$ contra la hipótesis alternativa $H_a)$ al menos un $\beta_i \neq 0$. Ésta prueba suele ser estudiada en el diseño de experimentos mediante la descomposición de la varianza en fuentes, una atribuida al modelo y otra residual. El estudio de descomposición de la varianza suele denominarse análisis de la varianza (ANOVA).

Análisis de la varianza

Una vez estimado el modelo correspondiente al diseño utilizado interesa evaluar si el efecto de los tratamientos sobre la variable de respuesta es significativo. En otros términos si existe algún tratamiento que tenga un impacto significativo sobre el valor medio de la variable de respuesta.

Las hipótesis en juego, análogas a la prueba de significación conjunta del modelo, son:

$$H_o) \tau_i = \tau_j \quad \forall i, h \in \{1, 2, \dots, t\} \quad H_a) \text{ Algún } \tau_i \neq \tau_j$$

que se evalúan mediante el cociente entre el cuadrado medio de los tratamientos y el cuadrado medio del error. Este estadístico se le suele denominar F_o , ya que se distribuye como una variable aleatoria F con $t-1$ grados de libertad en el numerador y $n-t$ grados

de libertad en el denominador. Desde la perspectiva de los modelos lineales, los $t-1$ grados de libertad de los tratamientos son el equivalente a las k restricciones que se imponen en la hipótesis nula.

Es de uso común resumir la información de la descomposición de la varianza en un cuadro denominado cuadro ANOVA. En dicho cuadro se descompone, según fuentes de variabilidad, la suma de cuadrados del fenómeno estudiado. Asimismo se muestran los grados de libertad, los cuadrados medios y el estadístico F_o . Las salidas de paquetes estadísticos suelen mostrar los resultados de los análisis según esta estructura.

Para decidir sobre la significación del modelo se puede emplear el valor-p que suele aparecer en las salidas de los paquetes estadísticos, o construir con una región de rechazo, que al $\alpha * 100\%$ de significación es de la forma:

$$\text{Región de rechazo} = \{(muestras : F_o > F_{t-1, n-t, \alpha})\}$$

esto es, se rechazará la hipótesis nula si con una muestra se obtiene un valor número del estadístico F_o que supere el valor del recorrido de una variable aleatoria F con $t-1$ y $n-t$ grados de libertad en el numerador y denominador respectivamente que deja a la derecha del mismo un α de probabilidad.

Si se rechaza la hipótesis nula, esto es, si se obtiene evidencia estadística suficiente en una muestra para refutar la hipótesis de que los tratamientos no presentan algún impacto significativo en el valor medio de la variable de respuesta, se procede a estudiar cuál o cuáles son esos tratamientos.

Comparación múltiple de medias

Una vez rechazada la hipótesis nula del cuadro ANOVA, interesa conocer cuál o cuales son los tratamientos que producen un efecto distinto en la variable de respuesta. En forma equivalente, bajo nuestro modelo de análisis sabemos que los datos correspondientes a cada tratamiento provienen de una población normal con media $\mu + \tau_i$ con $i = 1, \dots, t$ y varianza σ^2 , donde algunos efectos relativos son diferentes del resto. O sea, se está en presencia de datos provenientes de distintas poblaciones, que difieren sólo en el parámetro de ubicación, pero no se sabe cuántas poblaciones diferentes hay.

Se trata entonces de detectar diferencias de medias en las poblaciones que produjeron los datos que se registraron, bajo estructuras poblacionales con ley de probabilidades normal y varianza constante para todas las unidades sea cual sea la población de la que provienen. Las hipótesis en juego son de la forma, [5]

$$H_o^l = C_l \beta = m_l \text{ con la hipótesis global } H_o = \cap_{l=1}^q H_o^l$$

No existe un procedimiento único para resolver este problema. En general se habla de comparación múltiple de medias a los procedimientos que dan respuesta a este problema. Existe una amplia variedad de pruebas que proveen diferentes procedimientos para comparar media de más de dos poblaciones. En particular la utilización de comparaciones dos a dos tiene la desventaja de no controlar el nivel de significación de la prueba, el que nos puede llevar a resultados que no son significativos al nivel que se desea trabajar.

Los diferentes procedimientos para la comparación múltiple de medias están contruidos bajo distintas bases teóricas, por lo que los resultados de las pruebas suelen ser distintos. Se debe decidir entre la capacidad de detectar diferencias entre medias y la potencia de las pruebas cuando se elige trabajar con una prueba concreta. Es decisión del investigador si se desea adoptar un criterio conservador o no en la detección de diferencias significativas.

También hay elemento de decisión que son objetivos, como el utilizar una prueba que tenga en consideración que existe un tratamiento testigo, o utilizar un prueba que permita probar cierto tipo de hipótesis.

En el presente trabajo se utilizarán las pruebas de Tukey, y la prueba de comparación en presencia de un testigo de Dunnett.

La primera está basada en el estadístico del rango studentizado. Para cada par de tratamientos se compara la diferencia de medias con el percentil $1 - \alpha$ de la distribución del rango studentizado. La prueba declara dos medias significativamente diferentes si

$$|\bar{y}_i. - \bar{y}_{i'.}| > q_\alpha S_{\bar{y}_i.}$$

donde $\bar{y}_i.$ es el promedio de la variable de respuesta para las unidades a las que se les aplica el tratamiento i , $q_{1-\alpha}$ es la cuantila $1 - \alpha$ de la distribución del rango studentizado, y $S_{\bar{y}_i.}$ es el desvio típico de $\bar{y}_i.$. En total se realizan C_2^t diferencias de medias y todas se comparan contra el mismo valor crítico. De esta forma se controla la significación de la prueba para el conjunto de las comparaciones. Esta prueba es más exigente que otros procedimientos de comparación múltiple porque exige una mayor discrepancia entre medias de tratamientos para rechazar la hipótesis de igualdad.

La prueba de Dunnett es una prueba del tipo "todos contra uno" ya que compara el testigo contra los $t - 1$ tratamientos restantes. La diferencia de medias entre cada tratamiento y el testigo es comparada contra el percentil $1 - \alpha/2$ de la distribución del estadístico de la prueba que es una modificación de la distribución t -Student. Esto es, se rechaza cada hipótesis nula en juego cuando

$$|\bar{y}_i. - \bar{y}_{i'.}| > d_\alpha(t - 1, gl) \sqrt{\frac{2CM_{error}}{r}}$$

donde CM_{error} es el cuadrado medio del error, r es el número de observaciones por tra-

tamiento⁴, $d_\alpha(t - 1, gl)$ es el valor crítico de la prueba, el mismo depende del número de tratamientos $(t - 1)$ y de los grados de libertad del error (gl) , y puede ser encontrado en tablas o en paquetes estadísticos, [13].

⁴La expresión es válida sólo para diseños balanceados, existen expresiones alternativas para diseños no balanceados.

CAPÍTULO 5

Análisis descriptivo

En este capítulo se realiza la primera aproximación al objeto de estudio desde el marco teórico definido en los capítulos precedentes. El fin es tener una idea básica de la estructura general de los datos. Para ello se realiza un estudio exploratorio para describir los diferentes aspectos de los mismos. El capítulo se desarrolla en dos partes fundamentales.

Primero se explica brevemente el ensayo implementado por la empresa forestal COLONVADE SA. Por otro lado se realiza una primera aproximación a los registros de dendrométricos del ensayo de la empresa. En esta descripción se incluyen indicadores numéricos que resumen la distribución de los datos así como instrumentos gráficos que dan una idea de la estructura subyacente del fenómeno estudiado.

5.1

Plan de trabajo de la empresa

Se recuerdan los intereses de la empresa que llevan a la instalación del Ensayo Ríos 2000, [3]:

- .Evaluar los efectos de la poda sobre variables dendrométricas.
- Comparar la calidad de la madera de tratamientos seleccionados, en cuanto a proporción de leño conteniendo defectos y a propiedades físico-mecánicas.
- Evaluar la interacción de los tratamientos con la incidencia de agentes perjudiciales bióticos (m.o. patógenos, insectos plagas) o abióticos (viento).”

El ensayo fue instalado en el año 2000 en la localidad de Ríos en Rivera. La estrategia de trabajo de la empresa ha sido elegir niveles de poda y raleo extremos. Cada técnica

Nivel	Descripción	2001	2002	2003	2004
0	Testigo. Sin raleo	1000	1000	1000	1000
1	Baja drástica temprana.	500	500	500	500
2	Disminución media.	670	670	670	670
3	Población alta mantenida	1000	1000	1000	530
4	No definido	-	-	-	-

Datos expresados como densidades de plantación equivalente en árboles por hectarea.

Cuadro 5.1: Niveles de poda probados en el Ensayo Ríos 2000.

Nivel	2001	2002	2003
0	Testigo	Testigo	Testigo
1	1 troza	1 troza	1 troza (si se llega)
2	3 metros copa	-	Dominantes a 9 metros
3	4 metros de copa	3 metros de copa	3 metros de copa
4	5 metros de copa	4 metros de copa	4 metros de copa

Cuadro 5.2: Niveles de poda probados en el Ensayo Ríos 2000.

consta de 4 manejos distintos y un manejo testigo, los que se muestran en los cuadros 5.1 y 5.2. El nivel 4 del factor *raleo* no ha sido definido ya que en su momento se ha pensado en destinar a alguna alternativa productiva como, por ejemplo, producción de pulpa.

No son estudiados todos los cruces de cada nivel de un factor con el otro. Sólo se consideran los 18 tratamientos mostrados en el cuadro 5.3. El tratamiento testigo es el número 1, ya que no tiene asignado ningún tipo de raleo ni poda. Como el nivel 4 del factor raleo no ha sido definido, los tratamientos 5 y 9 son los mismos que los tratamientos 1 y el correspondiente a los niveles 0 y 1 de raleo y poda respectivamente.

Además es considerado un factor de bloqueo en función de las condiciones iniciales del suelo. El terreno en que se realiza la plantación es dividido en 54 parcelas de 330 m². En ellas se realiza la plantación inicial a una densidad equivalente de 1000 árboles por hectárea (a/ha), y se considera la altura promedio de los árboles por parcela. A partir de esas alturas se forman 3 grupos de 18 parcelas: las de mayor altura, las de altura media y las de menor altura, conformando así los 3 bloques del experimento. En cada bloque, se asignan aleatoriamente los 18 tratamientos a las parcelas. Es importante destacar que el ensayo es instalado sobre una plantación, esto es, se plantó el material experimental y se generaron los bloques según el procedimiento mencionado.

Los tratamientos son aplicados a lo largo del tiempo. Al año de aplicarlos se registran la altura y el diámetro a la altura del pecho (*DAP*) de cada árbol, así como si el árbol se encuentra vivo. Con estos datos se realizan estudios para determinar la eficacia de cada manejo en cada año.

		Poda				
		0	1	2	3	4
Raleo	0	1	x	x	15	18
	1	2	6	10	13	16
	2	3	7	11	14	17
	3	4	8	12	x	x
	4	5	9	x	x	x

Cuadro 5.3: Tratamientos empleados en el ensayo.

Año	DAP (en cms)	Altura (en mts)
2002 (Enero)	8,06	7,69
2002 (Octubre)	12,12	11,08
2003	16,18	16,47
2004	17,56	18,9
2005	19,05	20,35
2006	21,42	24,58

Cuadro 5.4: Evolución del diámetro a la altura del pecho y altura de los árboles en el Ensayo Ríos 2000

5.1.1. Evolución del ensayo Para ayudar a la comprensión de los resultados para el año 2006 del Ensayo Ríos se realiza una pequeña descripción de la evolución del experimento así como un breve resumen de los resultados encontrados en años anteriores en la siguiente sección.

El experimento ha sido seguido de cerca, sobretodo en los años en que se realizaron aplicaciones de poda y raleo. Se cuenta con registros anuales por árbol lo que permite estudiar el crecimiento de los mismos. La evolución de los registros dendrométricos es mostrada en la figura 5.1.1.

En la evolución de los registros se detecta un patrón creciente que es afectado por las diferentes operaciones de manejo en términos del incremento. Para el año 2002 se obtienen incrementos del orden del 33 % para las variables de interés siendo ese el año el de mayor incremento porcentual. Para el año siguiente los incrementos también son importantes, en el orden del 25 %, cayendo en forma importante para los años que siguen debido a la puesta en práctica de los manejos silviculturales. Para el año 2006 el incremento medio anual del diámetro a la altura del pecho y de la altura es de 11 % y 17 % respectivamente.

5.1.2. Resultados anteriores Para el factor poda considerado individualmente, al analizar como respuesta la altura, sólo en el año 2001 se hallaron diferencias significativas entre los niveles del factor, siendo el nivel 2 el de menor altura. Este nivel es el de mayor agresividad en la poda, ya que deja el menor porcentaje

de copa entre los distintos niveles. Considerando como respuesta el diámetro a la altura del pecho, se observó para el primer año que el nivel 2 produce menores valores que los otros niveles. A partir del año siguiente no se incluye el nivel 2 en el análisis por lo que se pierde esa información. En los restantes el nivel testigo presenta un mayor rendimiento, en segundo lugar los niveles 1 y 4, y en tercer lugar el nivel 3.

Por otro lado, para el factor raleo, al examinar como respuesta la altura no se encuentran diferencias significativas en ningún año. Para el diámetro a la altura del pecho en cambio se observa desde el primer año un ordenamiento claro, donde el nivel 1 ocupa el primer lugar, seguido por el nivel 2 y luego el testigo.

5.2

Los datos

La empresa mantiene un registro del desarrollo de cada árbol sistematizado en una planilla electrónica. La planilla presenta información de registros dendrométricos de diversos años por árbol, así como registros que permiten localizar el árbol en el cuadro de plantación. A partir de la información brindada por la empresa se construye una base de datos que incluye la información del manejo silvicultural aplicado a cada árbol.

En este punto se decide además trabajar únicamente con la parcelas efectivas. Esto es, al estar las parcelas dispuestas en forma contigua, los efectos del manejo que impactan en la competencia de los árboles podrían estar siendo confundidos en aquellos árboles que se encuentran en la líneas más alejadas del centro de la parcela. Por esta razón, se eliminan dichas líneas, se toma como criterio eliminar de la nueva base los árboles que pertenecen a las dos líneas más alejadas del centro de la parcela.

La base compuesta por los árboles de las parcelas efectivas suma en total 1480 árboles, de los cuales dos presentan valores faltantes en algunos registros dendrométricos. Se decide dejar de lado estas observaciones debido a la escasa importancia respecto al total de árboles.

5.3

Registros dendrométricos

Los registros dendrométricos de interés son el diámetro a la altura del pecho y la altura de cada árbol para el año 2006. El diámetro a la altura del pecho es la medición del perímetro del tronco a una altura de 1,30 metros respecto del suelo, y asumiendo que el tronco tiene una forma aproximadamente circular, se aproxima el diámetro.

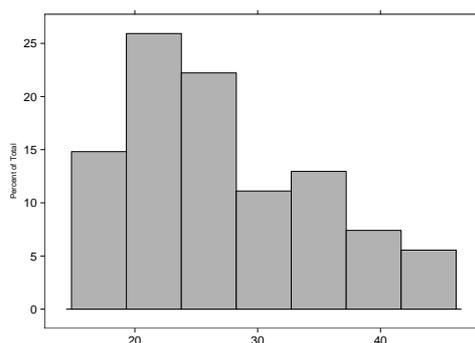


Figura 5.1: Histograma del número de árboles por parcela.

Al realizar medidas de resumen¹ sobre estas variables se observan valores mínimos de cero para cada variable. Estos valores corresponden a árboles que han muerto, lo que conlleva a tener diferente número de árboles por parcela. De hecho, como uno de los factores en estudio es el raleo, y presenta diferentes intensidades en los distintos niveles del factor, el número de árboles por parcela efectiva debe ser distinto. Además las parcelas no presentan cuadros de plantación idénticos, por lo que al efectuar el control de los efectos de borde, esto es la construcción de las parcelas efectivas, el número de árboles por parcela pudo haber sido afectado.

Si bien el interés de los manejos en la calidad de la madera recae en los árboles sobrevivientes, ya que son éstos los que se comercializarán, es importante estudiar la distribución de los árboles y de la mortandad de los mismos por parcela, ya que si un manejo produce mejor calidad de madera pero reduce en forma importante el número de árboles por parcela, se podría comprometer el resultado del volumen de madera por parcela.

Distribución del número de árboles por parcela

Con el objetivo de describir la distribución de árboles por parcela se construye una variable conformada por el número total de árboles por parcela. Esta variable se construye contando todos los árboles que se encuentran en cada parcela efectiva. La distribución de la variable es representada en la figura ??, en la que se observa una distribución un tanto asimétrica del número de árboles por parcela. El promedio es de 27,37 árboles por parcela siendo la mediana apenas inferior².

La distribución de árboles por parcela según bloque presenta un promedio similar al

¹Ver cuadro 7 del anexo por salidas

²Ver cuadro 7 del anexo por salidas

Nivel	Poda	Raleo
0	27,47	37,11
1	28,92	19,40
2	22,56	26,53
3	28,22	24,67
4	29,11	38,83

Cuadro 5.5: Número de árboles muertos por parcela según *raleo* y *poda*.

promedio general en los tres bloques. Sin embargo la apertura de la variable según los factores de estudio no es similar para los distintos niveles. Los valores medios se presentan en el cuadro 5.3 para cada nivel de *poda* y *raleo*.

Para el factor *raleo* se observa una distribución desigual del número medio de árboles en pie por parcela. Los niveles testigo (niveles 0 y 4) presentan los mayores valores, debido a la mayor densidad de plantación en estas parcelas. La intensidad de *raleo* queda en evidencia al observar los restantes valores. Se debe recordar que el nivel 1 de *raleo* consiste en una poda temprana muy intensa que reduce la densidad de plantación a 500 árboles por hectárea. Los manejos relacionados con los niveles 2 y 3 de *raleo* corresponden a una disminución media de la densidad de plantación a 670 árboles por hectárea al 2006 y una población alta mantenida con una disminución a 530 árboles por hectárea al año 2006 respectivamente.

Por otro lado, en los datos para el factor *poda* se observan valores muy similares del número medio de árboles por parcela para los diferentes niveles de *poda*, salvo para el nivel 2 de *poda*. El valor parece ser bajo en comparación con otros valores. Posiblemente este menor valor esté relacionado con la ausencia de un tratamiento de raleo testigo para el nivel de *poda* 2 lo que produce un desbalance en el cálculo del promedio. En otros términos para este nivel de *poda* los raleos que son probados no incluyen un tratamiento de no raleo que son los que presentan mayor número de árboles por parcela y por lo tanto la media es sensiblemente menor.

En resumen, la variable número de árboles por parcela efectiva presenta una distribución que por bloques es aproximadamente igual a la distribución general, pero desigual al mirarla por los niveles de los factores en estudio, esto es debido en gran medida a los diferentes tratamientos que son utilizados, en particular el raleo que altera las condiciones de competencia de los árboles.

Además es necesario considerar que los árboles pueden no sobrevivir (sobretudo cuando se están controlando condiciones de competencia), por lo que se espera que haya un número diferente de árboles sobrevivientes por parcela, incluso en las parcelas con tratamientos similares. Los fenómenos biológicos presentan una variabilidad muy amplia, y esto produce una importante heterogeneidad en los resultados de sobrevivencia. Dicha heterogeneidad puede jugar un rol importante en la decisión de la alternativa óptima de manejo, ya que

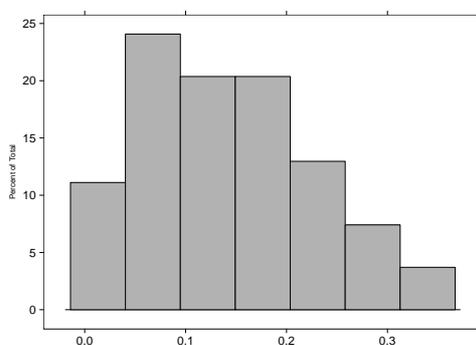
si un manejo produce una mortalidad superior a otros manejos, por más que produzca madera de mayor calidad el volumen producido puede ser menor.

5.4

Indicadores de competencia

Como fue dicho anteriormente, el número de árboles por parcela no es constante, por lo tanto no se debe examinar al número de árboles vivos en términos absolutos, sino en términos relativos al número de árboles efectivos por parcela. Se crearon las variables número de árboles muertos y el porcentaje de árboles muertos por parcela al año 2006. En total hay 219 árboles en esta categoría lo que significa un porcentaje general de 14,82 %.

La distribución del porcentaje de árboles muertos es representada en el siguiente gráfico



que presenta un forma similar a la distribución del número de árboles por parcela. Al examinar la media por bloque, se observan valores de 17,3 %, 14,2 % y 10,6 % para los bloques I, II y III respectivamente. Estos valores ponen de manifiesto las diferencias en los distintos bloques. El bloque I es el que presentó peores condiciones para los árboles desde el punto de vista de la sobrevivencia, mientras que el bloque III es el de mejor condición para la sobrevivencia de los árboles.

En el cuadro 5.4 se representan las tasas de mortandad de los árboles por raleo y poda. El análisis de estas tasas no es sencillo debido a la falta de balance que hay en los datos cuando se analiza los factores raleo y poda.

Para cada nivel de *raleo* y *poda* se reporta el cociente entre el número de árboles muertos y el número de árboles totales de las parcelas a las que se les aplicó los niveles de raleo y poda correspondientes³. En los márgenes de la tabla se encuentran las tasas de mortandad

³Por ejemplo el dato 28.8% que corresponde a los niveles cero de raleo y poda, indica que ese es el porcentaje de árboles muertos respecto al total observado en las 3 parcelas que fueron dejadas como testigo puro

		Raleo					
		0	1	2	3	4	
	0	28.8 %	12.6 %	8.9 %	12.1 %	19.5 %	16.4 %
	1		14.1 %	15.2 %	11.9 %	16.5 %	14.4 %
Poda	2		8.1 %	15.0 %	14.8 %		12.7 %
	3	13.6 %	6.7 %	6.0 %			8.8 %
	4	19.9 %	22.2 %	7.0 %			16.3 %
		20.8 %	12.7 %	10.4 %	12.9 %	18.0 %	14.8 %

Cuadro 5.6: Porcentaje de árboles muertos por Raleo según Poda.

marginales de cada factor.

Del cuadro 5.4 se destaca que la mortandad del testigo es 28.8%, el valor máximo que se observa en el cuadro. Este resultado es razonable, ya que el manejo asociado a este tratamiento es no realizar ningún manejo. La competencia es muy alta en estas parcelas y por lo tanto es mayor la proporción de muertos. Se debe recordar también que el nivel de raleo 4 no está definido a la fecha del experimento, por lo que las parcelas a las que se les designó este nivel de raleo son esencialmente idénticas al manejo testigo de raleo. En este punto es interesante destacar que el valor de mortandad de 19.5% observado para el nivel de poda cero y raleo 4 difiere bastante del valor del testigo puro.

Como es de esperar los manejos con algún nivel de raleo presentan menor proporción de muertos hasta cierto nivel en que la mortandad aumenta. Este resultado puede ser explicado por un excesivo raleo que deja más indefenso al monte frente a factores externos, como por ejemplo el viento. En este punto es importante destacar que los árboles no sólo compiten sino que también cooperan, y si bien es positivo para el conjunto de árboles una competencia baja, una excesiva dispersión en el campo de los árboles produce bajos niveles de cooperación ante factores abióticos como el viento.

Al examinar la distribución marginal de la mortandad para los niveles de poda, las diferencias podría ser explicada por la falta de balance que hay en los diferentes niveles de poda. Esto es, hay niveles de poda que están sobrerrepresentados en los raleos altos, y otros que están sobrerrepresentados en los niveles de raleo bajo. Este hecho hace difícil la comparación de los porcentajes de mortandad según poda.

Para evitar el desbalance recién mencionado, y teniendo en cuenta que hay un nivel de raleo que no es efectivo, ya que no se ha realizado ningún manejo para ese nivel, se decide reformular la estructura de tratamientos, reconsiderando los factores de raleo y poda. Se busca lograr una estructura que cruce los factores en todos sus niveles. Con este objetivo: (a) se eliminan del análisis las parcelas cuyos manejos no han sido definidos aún por lo que permanecían como testigos; (b) se asignan a las parcelas en que fueron realizados el manejo 4-1 de raleo-poda los niveles 0-1 de raleo-poda por ser equivalentes; y (c) se eliminan del análisis las parcelas con niveles de poda 2 y raleo 3. Con estos cambios se

		Poda			
		0	1	3	4
Raleo	0	1	9	15	18
	1	2	6	13	16
	2	3	7	14	17

Cuadro 5.7: Tratamientos empleados en la estructura reducida del ensayo.

		Raleo			
		0	1	2	
Poda	0	28.8 %	12.6 %	8.9 %	16.8 %
	1	16.5 %	14.1 %	15.2 %	15.3 %
	3	13.6 %	6.7 %	6.0 %	8.8 %
	4	19.9 %	22.2 %	7.0 %	16.3 %
		19.7 %	13.9 %	9.3 %	14.3 %

Cuadro 5.8: Mortandad según poda y raleo en una estructura de tratamientos balanceada.

logra otra estructura de tratamientos que puede ser considerada como una estructura factorial a dos vías. Los tratamientos asignados a los diferentes niveles quedan como los muestra el cuadro 5.7, donde se puede observar que todos los niveles de cada factor están cruzados con todos los niveles del otro factor.

La distribución de mortandad para esta nueva estructura de tratamiento esta resumida en el cuadro 5.8. En este nuevo cuadro se puede observar al igual que en el anterior que la mortandad de los árboles disminuye con la intensidad del raleo. La ventaja de este cuadro es que es posible comparar las tasas de mortandad de los diferentes niveles de poda ya que están representados los tres niveles de raleo. Se observan tasas de mortandad según poda similares para todos los niveles salvo el nivel 3 que es sensiblemente menor con respecto a los restantes.

La diferencia que hay en la mortandad de distintas parcelas hace pensar que es posible agrupar las parcelas según algún indicador que esté relacionada con la competencia que hay entre árboles en cada parcela. Un primer indicador es el porcentaje de árboles muertos. Por otro lado se calcularon dos medidas adicionales: el coeficiente y el factor de espaciamiento. Estas medidas se relevan sobre los árboles dominantes y codominantes, esto es sobre los árboles más grandes, computándose sobre los registros dendrométricos.

Estas medidas de competencia entre árboles pueden surgir como covariables para los modelos de clasificación que se quieren probar. Hay que marcar que esta covariable está muy relacionada con uno de los tratamientos, el raleo, ya que en sí la competencia es algo que se está controlando en el ensayo a través del raleo.

Se estudió la correlación de las eventuales covariables, detectando una correlación de aproximadamente 0.6 entre el factor y el coeficiente de espaciamiento. Por otro lado la correlación entre el porcentaje de árboles muertos y restantes medidas es baja. Al no contar con información a priori sobre la bondad de estas covariables para medir la competencia entre árboles, se deberán probar todas las alternativas posibles ya que no hay indicios fuertes de una gran asociación entre ellas.

Distribución de las variables dendrométricas

En esta sección se realiza el análisis descriptivo de las variables de respuesta de la base. Se cuenta con el registro de altura (*H06*) y diámetro a la altura del pecho (*DAP06*) al año 2006 de cada árbol. Con estos registros se obtiene una aproximación del volumen de cada árbol. Como los árboles presentan un forma aproximadamente cónica, el volumen se aproxima con el volumen de un cilindro ajustado por una constante. Esta constante, llamada factor de forma o factor de conicidad, es menor que la unidad y representa la proporción del cono en términos del cilindro. Este factor se obtiene de manera aproximada midiendo el diámetro de un árbol a distintas alturas. La forma de los árboles, en particular la conicidad, puede estar muy afectada por los diferentes manejos. Sin embargo no se cuenta con un factor de conicidad por manejo sino que se tiene un único factor para todos los árboles. Se calcula en forma aproximada la variable volumen (*VOL06*) por árbol al año 2006.

Se presentan en la figura 5.2 los diagramas de caja correspondiente a las variables dendrométricas, tomando como unidad cada parcela efectiva.

Para cada variable se observan diagramas bastante simétricos, con un recorrido intercuartílico sensiblemente menor al rango de cada variable, lo que podría estar evidenciando distribuciones heterogéneas. Se observan además dos datos atípicos para el diámetro a la altura del pecho que corresponden a parcelas que recibieron el tratamiento 2 (raleo con una baja drástica temprano sin podar).

Se debe tener cuidado con el examen de estos valores que parecerían no pertenecer al conjunto global de los datos. Las observaciones atípicas podrían no ser tales, esto es, podría suceder que en realidad se esté observando datos que se desprenden del conjunto general de los puntos debido a que estos provengan de diferentes poblaciones. Los factores y los bloques de análisis son las variables de clasificación que podrían dar lugar a las eventuales mezclas de poblaciones.

Es de interés entonces examinar si es posible detectar, al menos en forma exploratoria, si las diferentes variables de respuesta al ser estudiadas según los factores o por los bloques presentan comportamientos diferentes.

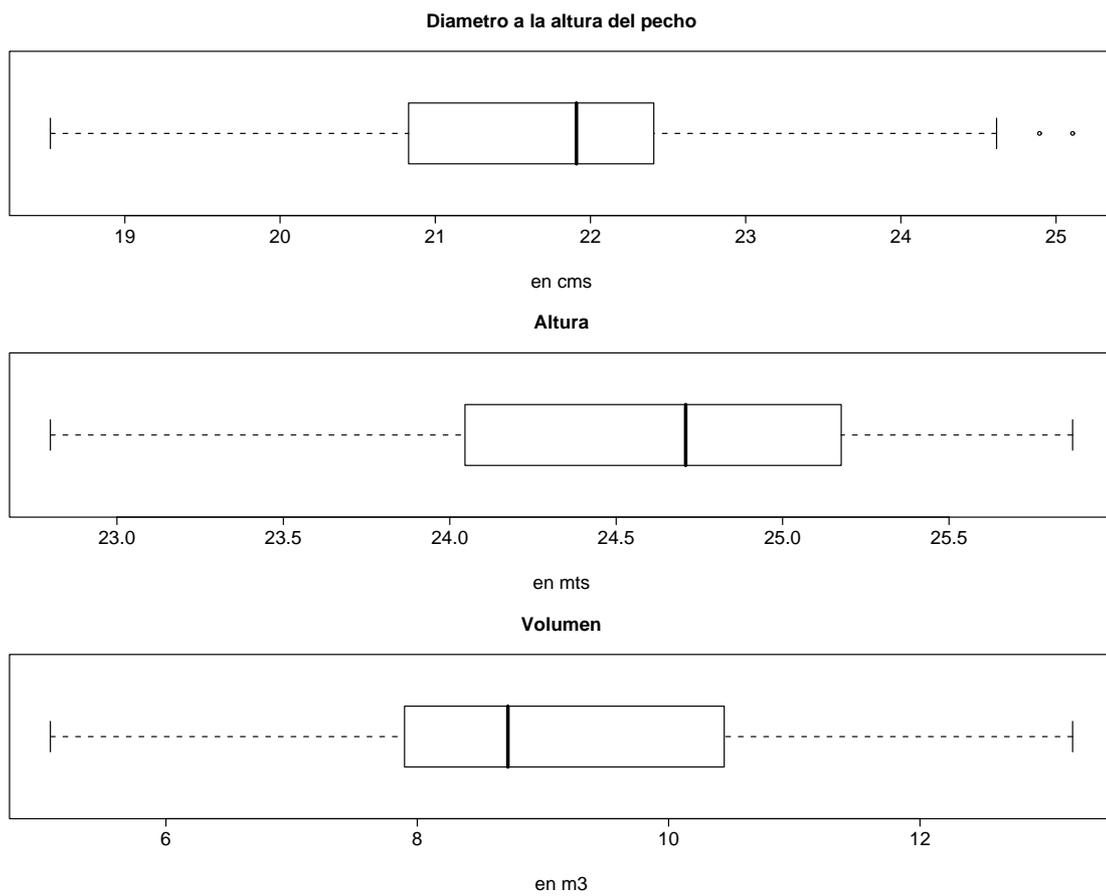


Figura 5.2: Diagrama de cajas para las variables dendrométricas

Poda	DAP	Altura	Volumen
0	21,81	24,58	8,92
1	21,52	24,52	9,62
2	22,35	24,92	8,15
3	21,29	24,60	9,45
4	21,63	24,39	9,16

Cuadro 5.9: Promedios de los registros dendrométricos según poda.

Para comenzar se estudió si el patrón observado en los diagramas de caja es particular a algún tratamiento, o más específicamente si algún nivel de raleo o poda, o algún bloque favorecen en particular este comportamiento. Los resultados fueron negativos, ya que al realizar los diagramas de caja (ver anexo) de las variables estudiadas según tratamiento, *raleo*, *poda* y *bloque*, se observa un patrón muy similar a los presentados en la figura 5.2.

De los diagramas de caja de las variables de respuesta por bloque se observan niveles medianos similares, lo que sugiere los bloques brindan resultados similares en las variables de respuesta. Este resultado es contrario a lo que se espera observar, ya que los bloques deberían representar grupos de unidades que sean homogéneos al interior y heterogéneos entre sí.

Del análisis de los diagramas de cajas⁴ por *poda* de las diferentes variables de respuesta se desprende que no hay clara evidencia de diferencias en los valores medianos. Mientras que cuando se estudia por *raleo*, las variables *diámetro a la altura del pecho* y *volumen* muestran diferencias en los valores medianos mientras que para la variable *altura* no es tan clara la diferencia.

Se agrega al análisis exploratorio los valores medios de los registros dendrométricos realizando una apertura según la variables *poda* y *raleo*. Los resultados son mostrados en las tablas 5.4 y 5.10. Al observar los cuadros en forma comparativa se detecta que para la apertura por *raleo* las diferencias reportadas son mayores que en la apertura por *poda*. Además se observa que para la variable *altura* los registros medios son más homogéneos para las variables restantes.

Estos resultados brindan algunos lineamientos a seguir en la modelización. Será necesario realizar procedimientos inferenciales para formalizar si las diferencias observadas o no observadas son significativas. Por un lado se deberá utilizar como variables de clasificación tanto a los factores de *raleo* y *poda*, así como los niveles cruzados de estos factores combinados en una sola variable.

Para estudiar la eventual asociación entre las variables dendrométricas es que en la figura 5.3 se presentan los gráficos de dispersión dos a dos de las variables, así como los histogramas de cada variable. De los gráficos se puede observar una asociación muy fuerte entre

⁴Ver anexo

Raleo	DAP	Altura	Volumen
0	20,36	24,62	10,30
1	23,17	24,52	7,52
2	21,63	24,67	9,43
3	22,03	24,84	8,80
4	19,88	24,22	10,65

Cuadro 5.10: Promedio de los registros dendrométricos según raleo.

las variables volumen y DAP. Para ayudar a la visualización se agregó una línea coloreada que se obtuvo mediante una suavización loess⁵. La curvatura de la línea de ajuste indica que la relación no es lineal. La asociación entre la altura y el DAP, y entre la altura y el volumen no es tan clara como en el caso anterior. En ambos gráficos se observa un cambio de pendiente de la curva loess.

Se calcularon medidas de asociación entre las variables. Aunque parecen no ser lineales las asociaciones entre las variables, se calculó el coeficiente de asociación lineal de Pearson y el coeficiente de asociación de Spearman. Los resultados⁶ confirman la alta asociación que hay entre el volumen y el diámetro a la altura del pecho. Por otro lado se observa que en los otros dos casos la asociación es también fuerte.

Es habitual en la producción forestal tomar como parámetro de calidad el diámetro a la altura del pecho. Se podría pensar que tomando sólo este atributo, se pierden otros importantes como lo son la altura del árbol, la forma del árbol, y el resultado de la interacción de estos tres que es el volumen. La alta asociación observada entre el *DAP* y el volumen muestra que no hay mucha pérdida de información al examinar sólo el *DAP*. Sobre este punto hay que remarcar que la medición del *DAP* en un árbol es mucho más sencilla en términos comparativos a la medición del volumen.

Del punto de vista de los análisis posteriores, la alta asociación entre *DAP* y volumen permite anticipar que los resultados para una variables serán esencialmente similares a los de la otra.

Por otro lado, si se toma en cuenta la fórmula de cálculo del volumen

$$\text{volumen} = (\text{DAP en cms})^2 * \pi/4 * \text{H en mts} * \text{Factor de Conicidad}$$

se espera que la asociación entre el volumen y el diámetro a la altura del pecho sea cuadrática dejando constante la altura. Esta asociación cuadrática es la que se observa en

⁵El método de suavizado loess se basa en regresiones locales de polinomios de bajo orden. Son especialmente útiles cuando no se conoce o no se quiere imponer una estructura funcional poblacional a un conjunto de datos.

⁶Ver anexo por resultados.

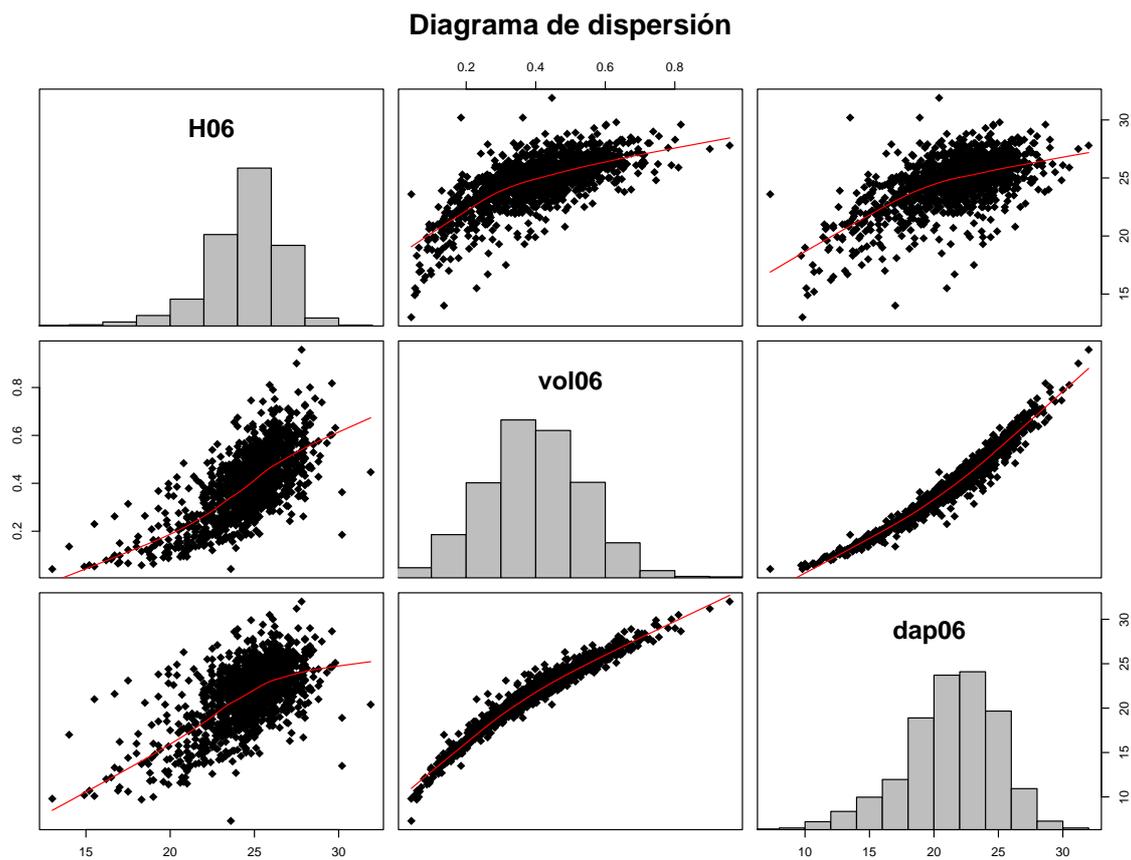


Figura 5.3: Gráfico de dispersión para las variables dendrometricas

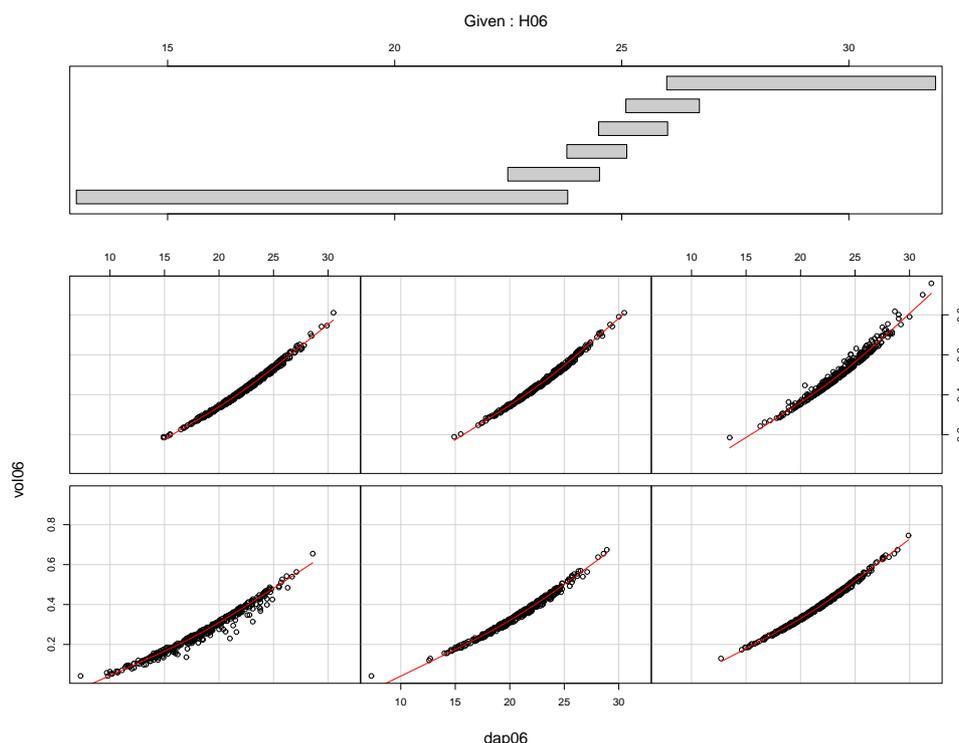


Figura 5.4: Gráfico de dispersión según rangos de altura.

el gráfico de dispersión y su intensidad queda confirmada por el alto coeficiente de asociación de Spearman. Surge como pregunta cuál es el rol de la altura en esta asociación, aparentemente la altura no influye en la asociación entre el volumen y el *DAP*. Para examinar más detenidamente esta asociación, se realizan gráficos de dispersión condicionados⁷ para rangos de valores de la altura el que se presenta en la figura 5.4.

Los rangos de altura crecen en los gráficos de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. En la cabecera del gráfico se observan barras que indican los rangos para los cuales fueron construídos los gráficos que se presentan inmediatamente más abajo. Por ejemplo, el gráfico de dispersión ubicado en el extremo inferior izquierdo, es realizado para los registro de altura de hasta aproximadamente 24 metros. Se agregó una línea de ajuste suave para ayudar a la visualización del patrón general de los datos. Se puede observar que el comportamiento de los datos, en términos del patrón de relacionamiento del *DAP* y el volumen, es aproximadamente constante, variando únicamente el nivel medio.

Teniendo en cuenta el análisis realizado, se decide trabajar con el diámetro a la altura del pecho y la altura del árbol como variables explicativas. La asociación entre el diámetro medio y el volumen medio permite prescindir de esta última, sin embargo es de interés conocer si los manejos generan diferencias en el *volumen total* producido por una parcela. En las parcelas raleadas, se espera un mayor volumen individual de cada árbol (por el

⁷Se suelen denominar a estos gráficos Coplots

efecto del raleo) al mismo tiempo que menor número de árboles. Esto provoca efectos contrapuestos, por lo que a priori no es posible determinar el resultado final sobre el volumen total. Es por esta razón que se decide además incluir como variable de respuesta el volumen total por parcela.

Del análisis descriptivo realizado en este capítulo y de la experiencia del Ensayo Ríos de análisis anteriores resumida en el capítulo anterior se conforma la base de análisis que sustenta las estrategias seguidas en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 6

Análisis de resultados

El objetivo de este capítulo es utilizar las técnicas estadísticas descritas en el marco teórico para analizar los datos presentados en el capítulo anterior.

Primero se ajustan modelos lineales para analizar las variables de respuesta del Ensayo Ríos 2000. Luego se realizan las pruebas que permiten detectar la alternativa óptima de manejo silvicultural según los modelos encontrados y validados. Para esto es necesario determinar qué tratamiento produce mejores resultados en la variable de respuesta, lo que se logra a partir de pruebas de comparación múltiple.

6.1

Ajuste de modelos

El ensayo fue concebido como un diseño en bloques, por lo que el modelo de análisis debería considerarlo. Respecto a este punto no hay consenso en términos de la estrategia de análisis.

Por un lado está la posición de quienes le dan más importancia al diseño respecto al modelo de análisis, esto es, se prefiere mantener en el modelo todos los componentes del diseño aunque algunos de ellos no sean significativos, para no romper la estructura de aleatorización del diseño; y por otro lado se encuentran quienes tienen una posición de predominancia del modelo de análisis, aunque el modelo de análisis no respete la estructura del diseño. Por ejemplo, si el diseño del ensayo tiene una estructura en bloques, y estos no son significativos en el modelo de análisis, la discusión se resume a estimar el modelo con o sin una estructura de bloques. Es importante destacar que los bloques se suelen generar para reducir la variabilidad experimental, por lo que aunque no sean significativos a nivel de análisis se pueden dejar en el modelo para tener una menor estimación de la varianza de los errores.

La estrategia seguida en este trabajo es encontrar un modelo de análisis que refleje la estructura de los datos, y no tanto la estructura impuesta por el ensayo. Por ello es que se comienza con un modelo de análisis que refleje lo mejor posible al ensayo y se le introducen modificaciones en busca de mejorar el rendimiento estadístico del modelo.

En el capítulo anterior fue realizada una primera aproximación al problema de estudio. Se detectó que existe un fenómeno de competencia de los árboles que fue descrito mediante la distribución del número de árboles vivos en pie bajo diferentes ángulos. Se decidió trabajar con los árboles sobrevivientes, ya que sobre ellos es que recae el interés de generar mayor valor en la etapa comercial. También fueron obtenidas otras medidas de competencia que podrían ser incluidas como covariables en los modelos.

Se definió como unidad experimental la parcela efectiva, esto es, el conjunto de árboles que han sobrevivido al año 2006 y que no pertenecen a las dos líneas externas de cada parcela. Por otro lado se definieron como variables de respuesta de interés el diámetro a la altura del pecho y la altura promedio por parcela, y el volumen total por parcela.

Además se definieron distintas estructuras de tratamientos, la estructura más simple fue la de una vía donde los diferentes niveles son las combinaciones de raleo y poda. También se consideró una estructura a dos vías, efectos de raleos y podas, donde es posible incorporar la interacción entre ambas. Para ello se reduce el diseño original a algunos, pero no todos, de los niveles de estos factores obteniendo un diseño factorial completo y balanceado.

Los modelos probados se presentan en dos grupos constituidos por los modelos sin y con covariables. Al interior de cada grupo los modelos se dividen en función de la estructura de tratamientos utilizada, la de una vía y la de dos vías (diseño reducido). El presente cuadro resume los tipos de modelo utilizados:

Estructura de tratamientos	Sin covariables	Con covariables
A una vía	Modelos A	Modelo C
A dos vías	Modelos B	Modelos D

Se trabaja únicamente con modelos de efectos fijos ya que los niveles probados son los de interés. Los bloques reflejan las distintas condiciones de suelo del sitio donde son plantados la mayor parte de la producción forestal de Eucalyptus de Uruguay. Por otro lado los factores reflejan todos manejos de interés para la empresa. Todos los modelos que son probados se estimaron en su versión completa, esto es, se parte de una especificación con el mayor número de componentes, y a partir de la significación de cada variable se eliminan en forma secuencial los componentes no significativos. Si se logra un modelo con al menos un componente significativo, se estudia la validación de los supuestos asociados al modelo y si no se detecta ninguna anomalía el modelo validado se destina al estudio de comparación de medias. Se trabaja siempre a un nivel de significación del 5%.¹

¹En el anexo se presenta las tablas ANOVA y los test diagnósticos de los modelos que no aparecen en el documento.

6.2

Grupo I: Modelos sin covariables

Modelos tipo A. Se comienza por la modelización más simple que permita reflejar la idea del Ensayo Ríos. Se considera un DBCA *a una vía* debido a que el ensayo consideró un factor de bloqueo. Los tratamientos son los 18 manejos silviculturales que se probaron en el ensayo, el modelo a estimar es de la forma

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, 18 \quad j = 1, \dots, 3$$

donde τ_i y β_j son los efectos del tratamiento i y del bloque j sobre el valor medio de la variable de respuesta, y_{ij} es el valor observado de la variable de respuesta para la parcela del bloque j a la que se le aplicó el manejo i , y ϵ_{ij} es el error experimental asociado a la unidad (i, j) . Estos errores deben ser variables aleatorias independientes con idéntica distribución normal con media nula y varianza constante. El cumplimiento de estos y otros supuestos deben ser estudiados en el modelo ajustado para poder realizar inferencias.

Los bloques no son significativos para ninguna de las tres variables de respuesta de interés. Esto puede estar indicando que la concepción del diseño no es correcta, o sea que, no es necesario bloquear, o que los bloques hayan sido realizados de manera incorrecta. Sin embargo, es posible que el efecto de los bloques sí sea significativo para algunos años de la vida de los árboles. Es posible que luego de transcurridos algunos años del desarrollo de los árboles, las condiciones iniciales que determinaron la creación de los bloques hayan sido diluidas con el transcurso del tiempo.

Si se eliminara el factor de bloqueo del modelo el análisis no se adaptaría a lo realizado en el campo, ya que la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales fue realizada bajo las restricciones que implican un DBCA. Sin embargo, se decide eliminar del modelo dicho factor por un criterio de parsimonia y no tener en el modelo elementos que no sean significativos. El modelo resultante es una simplificación del anterior:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, 18 \quad j = 1, \dots, 3$$

donde ahora el subíndice j no indica pertenencia al bloque j sino que es la repetición j . Al correr el modelo sin bloques se obtiene un modelo no significativo para la variable altura, mientras que para las variables *volumen total* y *diámetro a la altura del pecho* los modelos resultan significativos como lo muestra el cuadro 6.1 ².

En los modelos se cotejó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los residuos y la homoscedasticidad de los mismos, resultando los análisis negativos frente a anomalías.

²Ver anexo por salidas completas de las tablas ANOVA para cada variable de respuesta

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Tratamiento	17	79,949	4,703	5,915	0,000004
	Residuo	36	28,622	0,795		
Altura	Tratamiento	17	8,448	0,497	0,722	0,7604
	Residuo	36	24,7653	0,688		
Volumen	Tratamiento	17	102,58	6,034	2,854	0,00401
	Residuo	36	76,123	2,115		

Cuadro 6.1: Tabla ANOVA para los modelos tipo A.

Además se realizaron las pruebas diagnóstico para la detección de posibles observaciones influyentes. Se consideraron aceptables los resultados por lo que se obtiene el primer modelo validado para cada variable de respuesta.

De este grupo de modelos se desprende que los tratamientos tienen un impacto significativo en el *diámetro a la altura del pecho* promedio y en el *volumen total* por parcela. Sin embargo los tratamientos no explican la *altura promedio* por parcela, esto es, los diferentes manejos silviculturales no afectan la altura de los árboles en el año en que fueron medidos. Se debe tener en cuenta que la altura de los árboles depende principalmente del complejo sitio-especie, y por mayor o menor competencia que tengan los árboles, la altura de los mismos no puede crecer en forma indefinida. Es posible otra lectura adicional, y está relacionada con el manejo de *poda*. Al podar se reduce la copa viva del árbol y por lo tanto la capacidad de subsistencia del mismo. Si la *poda* es muy agresiva se podría reducir la capacidad de crecimiento del árbol e incluso matarlo. La no significación de los tratamientos en la *altura* de los árboles puede ser leída además como la elección de niveles de poda que no hicieron mermar la capacidad de crecimiento del árbol al menos para el sexto año. En otras palabras, si la *poda* tuvo en algún momento un efecto negativo en el desarrollo del árbol, este efecto se diluye completamente en el año de las mediciones.

Por otro lado, estos modelos tienen el atractivo de su sencillez. Presentan un efecto significativo de los tratamientos considerados como un sólo factor para las variables de respuesta, sin embargo no es posible estudiar el comportamiento de los tratamientos en su interior o la existencia de eventuales interacciones en las prácticas de raleo y poda. Surge la pregunta de si el efecto individual de los factores estudiados es significativo.

Modelos tipo B. Se decide trabajar con una estructura a dos vías. El efecto *tratamiento* utilizado en los modelos tipo A es separado en dos, el efecto *poda* y el efecto *raleo*. Se utiliza la misma estructura del cuadro 5.7 en la que cada nivel de un factor está cruzado con todos los niveles del otro factor. Se comienza con un modelo a dos vías con interacción y bloques. El modelo propuesto es de la forma

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \delta_j + (\tau\delta)_{ij} + \beta_k + \epsilon_{ijk} \quad \forall i = 0, 1, 2 \quad j = 0, 1, 3, 4 \quad k = 1, 2, 3$$

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Raleo	2	52,224	26,112	30,513	0,000
	Residuo	33	28,24	0,856		
Altura	Raleo	2	0,0976	0,0488	0,0663	0,936
	Residuo	33	24,2647	0,7353		
Volumen	Raleo	2	123,545	61,773	31,723	0,000
	Residuo	33	64,26	1,947		

Cuadro 6.2: Tabla ANOVA de modelos tipo B

donde τ_i es el efecto de los raleos, δ_j el efecto de las podas, $(\tau\delta)_{ij}$ el efecto de la interacción raleo-poda, y β_k el efecto de los bloques. Para los datos correspondientes al ensayo reducido se prueban sólo tres de los niveles de raleo y cuatro de los niveles de poda. Se sacrifican los resultados de los niveles restantes para poner énfasis en cada manejo por separado ya que de otra manera se perdería la ortogonalidad de los efectos. Las variables de respuesta son las mismas que fueron consideradas anteriormente.

Nuevamente se quitan en forma secuencial aquellos componentes que no son significativos. Para la variable altura se vuelve a obtener una no significación de la variables explicativas mientras que para las otras dos respuestas los modelos quedan reducidos a una sola vía siendo el único efecto significativo el raleo. Los modelos fueron sometidos a la validación de los supuestos y resultaron válidos, las tablas del análisis de varianza son reproducidas en el cuadro 6.2³.

Se refuerzan las conclusiones anteriores sobre la variable altura, esto es, ninguno de los dos manejos tiene impacto significativo sobre la altura, seguramente por haberse realizado los manejos en forma correcta y no habiendo puesto en riesgo el potencial de crecimiento de los árboles. Por otro lado las variables diámetro promedio y volumen total son únicamente explicadas por el raleo que es el factor que controla las condiciones de competencia entre árboles.

6.3

Grupo II: Modelos con covariables

Modelos tipo C y D. Para el segundo grupo de modelos se toma en cuenta la inclusión de covariables que permitan ajustar los efectos de los tratamientos por las condiciones de competencia de cada parcela. En la medida en que las covariables capturen la condiciones de competencias de las parcelas se espera que las estimaciones del modelo sean más precisas lo que redundará en mejores inferencias. En el capítulo de análisis descriptivo se

³Ver anexo por tabla ANOVA completa para cada variable.

sugirió medir la competencia, que podría estar confundiendo los resultados de las distintas condiciones de manejo, mediante el coeficiente de espaciamiento, el factor de espaciamiento o el porcentaje de árboles en pie por parcela.

Es importante destacar que las tres variables están altamente asociadas, según bases biológicas, a los tratamientos que se están probando. De hecho uno de los tratamientos, el raleo, busca controlar la competencia que hay entre los árboles reduciendo la densidad de plantación. Esta observación es de gran importancia a la hora de estudiar los resultados que se obtengan del análisis de covariables ya que estas covariables están asociadas a los manejos, lo que podría oscurecer los resultados que se obtengan. Es de uso común incluir covariables que no estén asociadas a los tratamientos que se prueban justamente para evitar oscurecer los resultados, [14], [11]. Para evitar este problema se resuelve incluir en el modelo la parte de la covariable que no puede ser atribuida a los tratamientos. Para ello se recurre a una modelización bietápica donde primero se ajusta un modelo explicando cada covariable en función de los tratamientos (en las dos estructuras de tratamientos probadas) y de los bloques. De este primer modelo ajustado se obtienen los residuos de estas regresiones que son justamente, el componente que no es explicado por los factores tratamientos y bloques, y son estos residuos incluidos como covariables en los modelos para las variables de respuesta de interés.

A modo de ejemplo, para la covariable *porcentaje de árboles en pie* (*por06*) se ajustó el siguiente modelo de primera etapa:

$$por06_{ij} = \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde τ_i y β_j son los efectos de los 18 tratamientos y los 3 bloques respectivamente y ϵ_{ij} el error experimental asociado a la unidad (i, j) . Una vez ajustado el modelo se obtienen los $\hat{\epsilon}_{ij}$ y son incluidos como covariable en el modelo de segunda etapa:

$$dap06_{ij} = \tau_i + \beta_j + \gamma\hat{\epsilon}_{ij} + \eta_{ij}$$

donde la nueva covariable no está asociada por los tratamientos. Nuevamente, la estrategia es comenzar con un modelo completo e ir quitando en forma secuencial los elementos no significativos. Se incluyen las tres covariables (los tres residuales ajustados de cada modelo de primera etapa), y los tratamientos y los bloques como variables de clasificación como modelo de partida en la segunda etapa. Las variables de respuesta son el *diámetro a la altura del pecho*, la *altura* y el *volumen total* medidos en el año 2006.

Se obtienen resultados similares a los hallados mediante los modelos del grupo I (modelos del tipo A y B) en ambas estrategias de agrupamiento de los tratamientos como lo muestran las tablas 6.3 y 6.4 ⁴. Nuevamente no se obtiene ningún componente significativo para explicar la altura de los árboles, lo que refuerza los resultados encontrados con el primer grupo de modelos.

⁴Ver anexo por tablas ANOVA completas para cada variable de respuesta

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Tratamiento	17	79,949	4,703	8,1505	1,026e-07
	ResPorMuertos	1	8,427	8,427	14,6048	
	Residuo	35	20,195	577		
Volumen	Tratamiento	17	102,58	6,034	8,158	1,33e-07
	ResCoefEspa	1	20,012	20012.	27,055	9,41e-06
	ResFactEspa	1	30,962	30962.	41,8588	2,127e-07
	Residuo	34	25,149	0,7397		

Cuadro 6.3: Tabla ANOVA para los modelos tipo C.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Raleo	2	123,545	31,772	40,783	1,579e-09
	ResFactEsp	1	15,797	15,797	10,43	0,002866
	Residuo	32	48,469	1,515		
Volumen	Raleo	2	123,545	61,772	40,783	1,579e-09
	ResFactEspa	1	15,797	15,797	10,43	0,002866
	Residuo	32	48,469	1,515		

Cuadro 6.4: Tabla ANOVA para los modelos tipo D.

Se realizaron las pruebas de diagnóstico para los modelos, no encontrando evidencia que rechace la normalidad de los residuos ni la homogeneidad de los grupos.

6.4

Resumen de modelos válidos

En las secciones anteriores se describió el procedimiento para obtener los modelos que se utilizarán para determinar la alternativa óptima del manejo silvicultural para la obtención de madera de calidad.

Para la variable de respuesta altura no se encontró evidencia de que algún manejo tuviera impacto sobre esa variable, resultado esperado si la poda se realiza en forma temprana.

Para las variables *diámetro a la altura del pecho* medio por parcela y *volumen total* por parcela se encontraron cuatro modelos para cada variable. Los componentes significativos para cada modelo se presentan en el cuadro 6.4.

La diferencia entre los cuatro modelos para cada variable de respuesta está dada por la

Factor	Covariables	DAP	VOL
Tratamiento	sin covariable	0,795	2,115
	con covariable	0,626	0,74
	Variación	-21,26 %	-65,01 %
Raleo	sin covariable	0,856	1,947
	con covariable	0,624	0,65
	Variación	-27,10 %	-66,77 %

Cuadro 6.5: Ganancias en precisión por la utilización de covariables

inclusión o no de covariables y por elección de la estructura de tratamientos reducida o no. La estructura de tratamientos no reducida considera cada manejo silvicultural como niveles distintos. De esta forma no es posible estudiar la relación entre los dos tipos de manejos que se están examinando, que son el raleo y la poda en distintas intensidades. La inclusión o no de covariables no altera la significación de los restantes componentes del modelo, por lo que su único impacto es reducir la estimación de la variabilidad experimental. Este aspecto permitirá tener más precisión en el experimento⁵.

En el cuadro 6.5 se muestra el cuadrado medio del error de los modelos válidos como una medida de la precisión. Las variaciones negativas indican disminuciones del cuadrado medio del error, esto es, incrementos en la precisión para las dos variables de respuesta. Se puede observar que en los modelos con covariables se obtienen importantes ganancias en precisión, ya que se reduce el cuadrado medio del error en un 1/4 para el diámetro a la altura del pecho y 2/3 para el volumen total.

De los modelos encontrados en este capítulo se puede concluir que, a partir de la información generada en el experimento, existe al menos una alternativa de manejo silvicultural que produce diferencias en el *diámetro medio* por parcela y en el *volumen total* de madera producida por parcela. Más aún, la alternativa de manejo forestal está asociada al raleo, siendo la poda incapaz de producir diferencias en estos registros dendrométricos. La poda, que se realiza para reducir la proporción de madera con defectos, no ha producido mermas en la capacidad de desarrollo de los árboles, o si en algún momento lo ha hecho a los seis años de vida estas secuelas no son detectables mediante los modelos empleados. Por otro lado el raleo sí produce diferencias significativas en las variables de interés. Surgen de este hecho al menos dos preguntas: ¿qué niveles de raleo producen mayores diámetros y por lo tanto madera de mayor calidad? y ¿es la mayor calidad de madera lograda mediante sacrificio de volumen total? La respuesta involucra la realización de comparación entre los valores medios por variable de cada tratamiento y es el objetivo del siguiente capítulo.

6.5

⁵Se entiende por precisión la capacidad del experimento para detectar diferencias entre tratamientos.

Repuesta <i>Diametro AP medio</i>	A	B	C	D
Tratamientos	x		x	
Bloques				
Raleo		x		x
Poda				
Raleo X Poda				
Porcentaje de árboles en pie			x	x
Factor de espaciamiento				
Coefficiente de espaciamiento				
Repuesta <i>Volumen total</i>	A	B	C	D
Tratamientos	x		x	
Bloques				
Raleo		x		x
Poda				x
Raleo X Poda				
Porcentaje de árboles en pie				x
Factor de espaciamiento			x	x
Coefficiente de espaciamiento			x	x

Cuadro 6.6: Resumen de modelos ajustados para las diferente respuestas. Las cruces indican que el componente de la primer columna es significativo en el modelo.

Determinación del manejo óptimo

El interés es detectar en forma conjunta la diferencia entre algunos niveles de los tratamientos, para ello no es suficiente realizar pruebas de comparación de los niveles dos a dos ya que de esta forma se controla sólo el nivel de significación para cada prueba. Se realiza en cambio una prueba de comparación múltiple que permite controlar el nivel de significación para el conjunto de comparaciones, [2], [13].

Por un lado, como es de interés conocer en particular la efectividad de los tratamientos respecto al testigo se utiliza la prueba de Dunnet. Esta prueba es de la forma "todos contra uno" ya que cada nivel es probado contra el testigo. Además se utiliza la prueba de comparación múltiple de Tukey, que prueba todos los tratamientos contra todos controlando también la significación de la prueba en forma conjunta para todas las comparaciones que se realizan.

Se decidió utilizar estas dos pruebas y no sólo la de Tukey porque esta última es muy conservadora en el sentido de que exige una gran discrepancia en los valores observados para decidir que dos tratamientos presentan diferencias. Si no se observaran diferencias entre los tratamientos comparados todos contra todos, la prueba de Dunnet podría arrojar alguna diferencia al menos entre los tratamientos probados contra el testigo.

Como se dijo anteriormente la utilización de covariables en los modelos propuestos resultó significativa por lo que se obtuvieron ganancias en la precisión. Para estos modelos se realizaron las pruebas recién mencionadas.

Modelos a una vía Para la estructura de tratamientos a una vía, se obtuvieron los resultados mostrados en los cuadros 6.5 y 6.8. En los cuadros se reportan los valores medios de diámetro a la altura del pecho y volumen total para cada tratamiento. Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de comparación de medias de Tukey.

En el cuadro 6.5 se observa que los tratamientos que aparecen ubicados en la parte inferior de la figura son los relacionados con las parcelas no raleadas. Los tratamientos que arrojan diferencias significativas respecto del testigo son los tratamientos 2, 16 y 10, los tres asociados a niveles de raleo bajo. Como fue dicho anteriormente la prueba de Tukey es muy exigente, y cuando en particular se tiene un tratamiento testigo la prueba de Dunnet es apropiada para examinar diferencias, [13]. La prueba de Dunnet tiene resultados similares, mostrando como tratamientos con respuesta diferente al testigo al tratamiento 6 además de los detectados por la prueba de Tukey.

Por otro lado para el volumen total se observa un orden basado en las medias muestrales prácticamente opuesta a la observada para el diámetro a la altura del pecho. Al realizar la prueba de Tukey el único tratamiento que aparece con diferencias significativas en el volumen total respecto del testigo es el 16, lo que es ratificado por la prueba de Dunnet

Tratamiento	Raleo	Poda	Promedio	
2	1	0	24.404	a
16	1	4	23.223	a b
10	2	2	23.174	a b
6	1	1	22.951	a b c
4	3	0	22.542	a b c d
13	1	3	22.084	a b c d e
12	3	2	21.995	b c d e
11	2	2	21.872	b c d e
7	2	1	21.781	b c d e
14	2	3	21.599	b c d e
8	3	1	21.55	b c d e
17	2	4	21.454	b c d e
3	2	0	21.433	b c d e
1 (testigo)	0	0	20.681	c d e
18	0	4	20.212	d e
15	0	3	20.199	e
5	4	0	19.977	e
9	4	1	19.785	e

Cuadro 6.7: Comparación múltiple de medias para la estructura de tratamientos a una vía para diámetro a la altura del pecho.

Tratamiento	Raleo	Poda	Total						
15	0	3	10.974	A					
9	4	1	10.97	A					
18	0	4	10.92	A					
7	2	1	10.706	A	B				
5	4	0	10.333	A	B	C			
17	2	4	10.271	A	B	C			
14	2	3	10.025	A	B	C	D		
1 (testigo)	0	0	9.005	A	B	C	D	E	
4	3	3	8.885	A	B	C	D	E	F
12	3	2	8.778	A	B	C	D	E	F
8	3	1	8.73	A	B	C	D	E	F
3	2	0	8.552	A	B	C	D	E	F
6	1	1	8.077		B	C	D	E	F
10	1	2	8.057			C	D	E	F
2	1	0	7.836			C	D	E	F
11	2	2	7.601				D	E	F
13	1	3	7.349					E	F
16	1	4	6.286						F

Cuadro 6.8: Comparación múltiple de medias para la estructura de tratamientos a una vía para volumen total.

Raleo	Dap	Vol total	
1	23.17	8.81	a
2	21.57	11.11	b
0	20.22	13.35	c

Cuadro 6.9: Tabla de comparación múltiple de medias para la estructura de tratamientos a dos vías.

Comparación	Estimación	Desvio Est.	t	p valor
1 - 0 = 0	-4.5375	0.5024	-9.031	<1e-04
2 - 0 = 0	-2.2351	0.5024	-4.449	0.000250
2 - 1 = 0	2.3024	0.5024	4.583	0.000235

presentando un menor volumen total por parcela.

Al analizar en forma conjunta estos dos resultados se observa que los tratamientos 2, 6 y 10 son efectivos para incrementar la calidad de la madera realizando raleos sin tener pérdidas en el volumen total de las parcelas. Estos tratamientos están asociados a los manejos de raleo del tipo baja drástica temprana y los niveles de poda 0,1 y 2 respectivamente. Los resultados indican la conveniencia de realizar raleos ya que se producen diferencias significativas respecto a no ralear en el atributo de calidad que se considera sin perder volumen de producción incluso en las etapas tempranas de crecimiento del árbol. Estos resultados son obtenidos para el sexto año de crecimiento, y ya se puede detectar la conveniencia de realizar ciertos manejos. De todas formas hay que considerar que estos resultados son parciales, aún quedan años de crecimiento en los árboles y es de esperar que aquellos que se encuentren más espaciados tengan un mejor y mayor desarrollo por lo que los resultados serán más claros. Sin embargo no es menor observar que en lapso ya se están cumpliendo en forma parcial los objetivos buscados con el manejo forestal.

Al examinar cuáles manejos son los involucrados en cada tratamiento se detectan algunos patrones aunque no del todo claros. Para empezar, no resulta evidente una asociación con los niveles de poda. Es importante recordar un resultado hallado en el capítulo anterior que es el asociado a la no significación del factor poda para explicar las variables dendrométricas. Por otro lado parecerían ser los tratamientos asociados al nivel de raleo 1 los que presentan mayores diámetro medio y menor volumen por parcela, y los niveles asociados al raleo 0 (sin ralear) los que presentan un comportamiento opuesto.

Para estudiar mejor estos patrones se utiliza los modelos asociados a la estructura a dos vías, que por los criterios manejados en el capítulo anterior en cuando a al ajuste del modelo contienen únicamente el factor raleo.

Modelos a dos vías Los resultados obtenidos en la prueba de comparación de Tukey para los modelos de estructura a dos vías se reportan en el cuadro 6.5 y se resumen en la tabla 6.9 en la que se observa que hay diferencias significativas entre los tres niveles de raleo para las dos variables de interés. No es necesario realizar la prueba de Dunnett ya que con la prueba de Tukey, que es más conservadora, se detectaron diferencias entre todos los niveles. Además se observa que el orden en una y otra variables es exactamente el opuesto, por lo que los tratamientos con mejor rendimiento en el atributo de calidad, el diámetro a la altura de pecho, son los que generan menor producción.

La comparación múltiple de medias para los modelos reducidos resulta en un ordenamiento mucho más claro, ya que se encuentran diferencias entre todos los niveles de raleo para el diámetro a la altura del pecho y el volumen total. Se detecta claramente que con el manejo asociado al raleo 1 (baja drástica temprana) se obtiene mayor diámetro promedio de los árboles sacrificando volumen total al menos para el sexto año de crecimiento. En el otro extremo se encuentra el manejo testigo que no ha sido raleado con el mayor volumen de producción y el menor diámetro medio por parcela.

Comparando estos resultados con el obtenido para la estructura a una vía surgen discrepancias que pueden estar explicadas por la precisión de los diferentes análisis, en la estructura a una vía los datos se estudian en forma simultánea 18 niveles de un factor mientras que para la estructura a dos vías se estudian sólo niveles tres niveles de un factor.

Es importante recordar que estos son resultados parciales al sexto año de crecimiento, y es de esperar que en los próximos años de desarrollo de los árboles se observe un mayor desarrollo en aquellas parcelas donde la densidad de plantación es menor.

También es interesante observar que estos resultados concuerdan con los hallados años anteriores, como fue mencionado en el capítulo 5 existe un claro ordenamiento de los niveles de raleo. Por otro lado, como fue mostrado en el capítulo 6 si el patrón de crecimiento observado en el incremento medio anual del volumen total se mantiene, las parcelas con menores densidades de plantación generarán mayor volumen total a pesar de contar con un número menor de árboles. Esto es, es de esperar que en los próximos años de desarrollo los árboles que estén más espaciados crezcan a mayores tasas que los que se encuentran en las parcelas con menor intensidad de raleo.

En suma, al sexto año de crecimiento se detecta el Ensayo Ríos una eficacia en la aplicación de raleos para obtener árboles con mayor diámetro. Dentro de los niveles de raleo el que presenta la mejor performance es el nivel de raleo asociado a una baja drástica temprana frente al de una disminución media. Estos resultados se obtienen sacrificando volumen total de producción, lo que se espera que sea revertido en los próximos años de crecimiento debido a la situación favorable que se encuentran frente a los árboles de las parcelas no raleadas.

CAPÍTULO 7

Síntesis y conclusiones

La obtención de madera de calidad en *Eucalyptus* es una preocupación reciente de los productores forestales.

Diversos aspectos naturales del crecimiento y desarrollo de los árboles degradan la calidad de la madera. Es posible controlar estos aspectos para producir madera sin defectos mediante procedimientos y técnicas adecuadas.

Con el interés de generar resultados locales de este fenómeno, la empresa forestal COLONVADE SA instala en el año 2000 el ensayo Ríos en suelos del norte del país.

En el ensayo se probaron diferentes manejos silviculturales que consistieron en distintas combinaciones de raleos y podas. La utilización conjunta de estos manejos produce resultados que se potencian.

El raleo es la disminución de la densidad de plantación provocando un mayor crecimiento individual en cada árbol. La poda consiste en quitar ramas del árbol. Si la poda se realiza en forma temprana y sobre ramas superfluas se puede obtener madera con menor cantidad de desperfectos naturales y sin comprometer el desarrollo del árbol.

Las variables de estudio fueron el diámetro a la altura del pecho media por parcela, la altura media por parcela y el volumen total por parcela. Del estudio descriptivo surgió la posibilidad de utilizar información sobre la competencia de los árboles.

Se ajustaron modelos lineales para las variables mencionadas, utilizando variables de clasificación, que representaron los diferentes manejos, y covariables que midieron la situación de competencia entre los árboles.

Para la altura media por parcela no se obtuvo ningún modelo significativo¹, mientras que para las restantes variables se obtuvieron modelos ajustados por covariables y otros

¹Se trabajó al 5 % de significación.

sin ajustar. En todos los casos la variable poda no resultó significativa. Estos resultados permiten pensar en una correcta aplicación de la poda que no provocó diferencias en el potencial de crecimiento de los árboles. Por otro lado también fue efectivo el manejo asociado al raleo ya que produce alguna diferencia del diámetro a la altura del pecho entre los distintos niveles.

Para determinar la alternativa de mejor performance se realizaron pruebas de comparaciones múltiples. Se obtuvo un ordenamiento basado en los modelos que permitió detectar que el mejor manejo con la información al sexto año es realizar una reducción drástica temprana de la densidad de plantación. En el ensayo Ríos esto consistió en reducir a la mitad la densidad original al año de instalado el ensayo. Este resultado no se logra sin comprometer el volumen total por parcela, de hecho al sexto año este manejo es el que genera el menor volumen de producción.

Es necesario recordar que estos resultados son parciales ya que tienen en cuenta sólo el crecimiento al sexto año, siendo este plazo menor al periodo productivo. Es de esperar que en los próximos años de crecimiento los árboles que estén en condiciones de mayor espaciamiento tengan un mejor desarrollo que los restantes, por lo que se espera que se compense el menor volumen total por parcela provocado por el menor número de árboles con un mayor volumen individual.

Bibliografía

- [1] Aparicio, J., Canizza, F., Ghío, A., Larocca, F. Silvicultura de Eucalyptus Grandis para madera de usos sólidos en el sudoeste de Corrientes. INTA Bella Vista.
- [2] Cabaña, E. *Modelos Lineales*. UDELAR, 2007. Notas de apoyo para el curso de la Licenciatura en Estadística.
- [3] Colonvade SA. *Presentación de los resultados del Ensayo Ríos 2000*.
- [4] Fondo Nacional de Preinversión Secretaría de la Organización de los Estados Americanos Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, editor. *Uruguay - Alternativas para la Transformación Industrial del Recurso Forestal*. OEA, 1996.
- [5] Hothorn, T. Simultaneous inference procedures for general linear hypotheses. Technical report, R-project, CRAN, 2007.
- [6] Johnson, R., Wichern, D. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, 1992.
- [7] Kolln, R. Criterios de poda y raleo en Eucalyptus Grandis en Shell. Technical report, Shell - C.A.P.S.A.
- [8] Martínez Garza, A. *Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría*. Trillas, 1988.
- [9] Methol, R., Balmelli, G., Resquín, F. Evaluación al tercer año de distintos esquemas de raleo en Eucalyptus Grandis. In *Segunda Jornada Forestal*. INIA Tacuarembó.
- [10] Methol, R., Balmelli, G., Resquín, F. Evaluación de la intensidad de poda en Eucalyptus Grandis al tercer año de crecimiento. In *Segunda Jornada Forestal*. INIA Tacuarembó.
- [11] Milliken, G. - Johnson, D. *Analysis of Messy Data*, volume III: Analysis of Covariance. Chapman & Hall/CRC, 2002.

-
- [12] Monteiro, L. *Introdução à Biometria utilizando R*. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006.
- [13] Montgomery, D. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 1997.
- [14] Neter, J., Kutner, M., Nachtsheim, C., Wasserman, W. *Applied linear statistical models*. IRWIN, 1996.
- [15] R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2005. ISBN 3-900051-07-0.
- [16] Rencher, A. *Linear models in statistics*. John Wiley & Sons, 2000.
- [17] Roderik H. Shield, E. *Perspectivas para la transformación con alto valor de las plantaciones de Eucalyptus en Uruguay*. PRAIF-II, 1994.
- [18] Vikneswaran. An R companion. <http://cran.r-project.org>, Agosto 2005.

Anexo Estadístico

En este apartado se presentan varias salidas del software estadístico utilizado².

Medidas de resumen

	Altura	Diámetro	Volumen
Mínimo	0	0	0
Primer cuartil	22,2	17,26	0,2159
Mediana	24,5	21,1	0,3635
Media	20,94	18,28	0,3316
Tercer cuartil	25,9	23,6	0,4679
Máximo	31,9	32	0,9577

Cuadro 7.1: Medidas de resumen para las variables dendrométricas por árbol para los datos originales.

Min.	Cuartil 1	Mediana	Media	Cuartil 3	Max.
16	21	27	27,37	32,75	45

Cuadro 7.2: Medidas de resumen del número de árboles por parcela

1	2	3
27.72222	28.05556	26.33333

Cuadro 7.3: Medias del número de árboles por parcela en cada bloque.

²Se empleo el lenguaje y entorno para el cómputo estadístico R, [15].

	Altura	Diámetro	Volumen
Altura	1	0,5942618	0,6946292
Diámetro	0,5942618	1	0,9716641
Volumen	0,6946292	0,9716641	1

Cuadro 7.4: Correlaciones de Pearson para las covariables

	Altura	Diámetro	Volumen
Altura	1	0,5373698	0,682796
Diámetro	0,5373698	1	0,9784048
Volumen	0,682796	0,9784048	1

Cuadro 7.5: Correlaciones de Spearman para las covariables

Diagramas de cajas

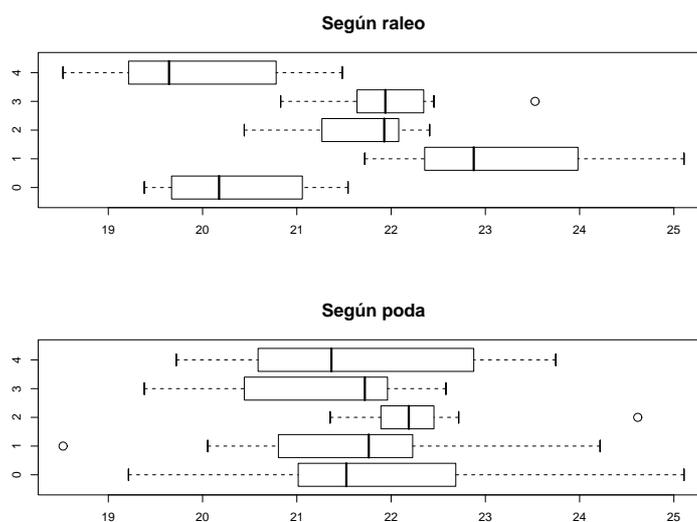


Figura 7.1: Diagramas de caja del diámetro a la altura del pecho según poda y raleo

Tablas ANOVA

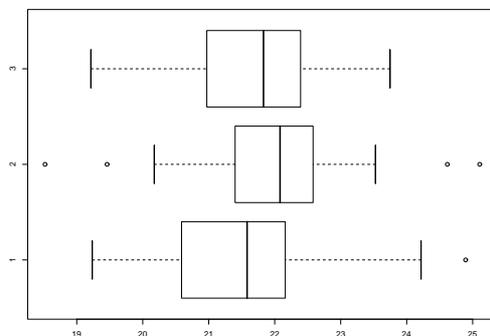


Figura 7.2: Diagramas de caja del diámetro a la altura del pecho según bloque

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Tratamiento	17	79,949	4,703	5,8731	6,084e-06
	Bloque	2	1,396	698	872	0,4273
	Residuo	34	27,226	801		
Altura	Tratamiento	17	8,448	0,4969	0,7419	0,7402
	Bloque	2	1,9914	0,9957	1,4865	0,2405
	Residuo	34	22,7739	0,6698		
Volumen	Tratamiento	17	102,58	6,034	2,7396	0,006044
	Bloque	2	1,234	617	0,2802	0,757334
	Residuo	34	74,888	2,203		

Cuadro 7.6: Tabla ANOVA para la configuración inicial de los modelos tipo A.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Raleo	2	52,224	26,112	31,207	3,768e-07
	Poda	3	3,808	1,269	1,517	0,2379
	Bloque	2	0,13	65	0,0776	0,9256
	Raleo*Poda	6	5,894	982	1,174	0,3556
	Residuo	22	18,408	837		
Altura	Raleo	2	0,0976	0,0488	0,0586	0,9432
	Poda	3	0,2728	0,0909	0,1093	0,9538
	Bloque	2	1,2178	0,6089	732	0,4923
	Raleo*Poda	6	4,474	0,7457	0,8964	0,5148
	Residuo	22	18,3002	0,8318		
Volumen	Raleo	2	123,545	61,772	29,3805	6,13e-07
	Poda	3	8,203	2,734	1,3005	0,2993
	Bloque	2	1,404	702	334	0,7197
	Raleo*Poda	6	8,404	1,401	0,6662	0,6777
	Residuo	22	46,255	2,102		

Cuadro 7.7: Tabla ANOVA para la configuración inicial de los modelos tipo B.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Tratamiento	17	79,949	4,703	8,172	3,067e-07
	Bloque	2	1,396	698	1,2133	0,31095
	ResPorMuertos	1	8,427	8,427	14,6433	0,00059
	ResCoefEsp	1	934	934	1,6229	0,21216
	ResFactEsp	1	25	25	43	0,83711
	Residuo	31	17,84	575		
Altura	Tratamiento	17	8,448	0,4969	0,9947	0,4882686
	Bloque	2	1,9914	0,9957	1,993	0,1533703
	ResPorMuertos	1	0,1075	0,1075	0,2152	0,6459951
	ResCoefEsp	1	6,8147	6,8147	13,6405	0,0008499
	ResFactEsp	1	0,3644	0,3644	0,7294	0,3996338
	Residuo	31	15,4874	0,4996		
Volumen	Tratamiento	17	102,58	6,034	8,1395	3,21e-07
	Bloque	2	1,234	617	0,8326	0,4444076
	ResPorMuertos	1	2,436	2,436	3,2864	0,0795496
	ResCoefEsp	1	35,845	35,845	48,3515	8,419e-08
	ResFactEsp	1	13,625	13,625	18,3794	0,0001635
	Residuo	31	22,982	741		

Cuadro 7.8: Tabla ANOVA para la configuración inicial de los modelos tipo C.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Raleo	2	52,224	26,112	39,2388	1,793e-07
	Poda	3	3,808	1,269	1,9074	0,16266
	Bloque	2	0,13	65	0,0976	0,90748
	ResFactEsp	1	34	34	0,0507	0,82421
	ResCoefEsp	1	1,647	1,647	2,4757	0,13212
	ResPorMuer	1	5,175	5,175	7,7767	0,01171
	Raleo*Poda	6	4,802	0,8	1,2026	0,34727
	Residuo	19	12,644	665		
Altura	Raleo	2	0,0976	0,0488	0,1048	0,900992
	Poda	3	0,2728	0,0909	0,1954	0,898239
	Bloque	2	1,2178	0,6089	1,3084	0,293529
	ResFactEsp	1	6,1267	6,1267	13,1651	0,001789
	ResCoefEsp	1	0,3532	0,3532	759	0,394529
	ResPorMuer	1	6,4105	6,4105	13,7751	0,00148
	Raleo*Poda	6	1,0418	0,1736	0,3731	0,886997
	Residuo	19	8,842	0,4654		
Volumen	Raleo	2	123,545	61,772	71,8339	1,383e-09
	Poda	3	8,203	2,734	3,1796	0,047652
	Bloque	2	1,404	702	0,8165	0,4568902
	ResFactEsp	1	15,632	15,632	18,1781	0,0004198
	ResCoefEsp	1	932	932	1,0839	0,3109035
	ResPorMuer	1	19,507	19,507	22,6838	0,0001354
	Raleo*Poda	6	2,249	375	0,4359	0,8457393
	Residuo	19	16,339	0,86		

Cuadro 7.9: Tabla ANOVA para la configuración inicial de los modelos tipo D.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
Porcentaje de árboles caídos	Tratamiento	17	0,1789	0,0105	2,0201	0,03975
	Bloque	2	0,041	0,020	3,8912	0,03008
	Residuo	34	0,178	0,005		
Factor de espaciamiento	Tratamiento	17	155,438	9,143	5,1771	1,701e-05
	Residuo	36	63,58	1,766		
Coeficiente de espaciamiento	Tratamiento	17	153,865	9,051	2,0783	0,03214
	Residuo	36	156,777	4,355		

Cuadro 7.10: Tabla ANOVA para el ajuste de las covariables.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Tratamiento	17	79,949	4,703	8,1505	1,026e-07
	ResPorMuertos	1	8,427	8,427	14,6048	
	Residuo	35	20,195	577		
Altura	Tratamiento	17	8,448	0,4969	0,9947	0,488269
	Bloque	2	1,9914	0,9957	1,993	0,15337
	ResPorMuertos	1	0,1075	0,1075	0,2152	0,645995
	ResCoefEsp	1	607	607	1,2149	0,278846
	ResFactEsp	1	6,5721	6,5721	13,1549	0,001018
	Residuos	31	15,4874	0,4996		
Volumen	Tratamiento	17	102,58	6,034	8,158	1,33e-07
	ResCoefEspa	1	20,012	20012.	27,055	9,41e-06
	ResFactEspa	1	30,962	30962.	41,8588	2,127e-07
	Residuo	34	25,149	0,7397		

Cuadro 7.11: Tabla ANOVA para los modelos tipo C.

	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	valor p
DAP	Raleo	2	123,545	31,772	40,783	1,579e-09
	ResFactEsp	1	15,797	15,797	10,43	0,002866
	Residuo	32	48,469	1,515		
Altura	Raleo	2	0,0976	0,0488	0,1048	0,900992
	Poda	3	0,2728	0,0909	0,1954	0,898239
	Bloque	2	1,2178	0,6089	1,3084	0,293529
	ResFactEsp	1	6,1267	6,1267	13,1651	0,001789
	ResCoefEsp	1	0,3532	0,3532	759	0,394529
	ResPor	1	6,4105	6,4105	13,7751	0,00148
	Raleo * Poda	6	1,0418	0,1736	0,3731	0,886997
	Residuos	19	8,842	0,4654		
Volumen	Raleo	2	123,545	61,772	40,783	1,579e-09
	ResFactEspa	1	15,797	15,797	10,43	0,002866
	Residuo	32	48,469	1,515		

Cuadro 7.12: Tabla ANOVA para los modelos tipo D.

	Respuesta	K^2 Bartlett	valor p	W Shapiro-Wilk	valor p
Modelos A	Diámetro	9,0012	0,9402	0,971	0,2129
	Volumen	11,9726	0,8018	0,9849	0,729
Modelos B	Diámetro	2,5925	0,2736	0,9826	0,8303
	Volumen	2,342	0,3096	0,9863	0,9261
Modelos C	Diámetro	9,0012	0,9402	0,9771	0,3871
	Volumen	11,9726	0,8018	0,9885	0,8811
Modelos D	Diámetro	2,5925	0,2736	0,9764	0,6236
	Volumen	2,342	0,3096	0,9639	0,2827

Cuadro 7.13: Medidas de diagnóstico para los modelos de interés. Se reportan los estadísticos de las pruebas de Bartlett para homogeneidad de varianzas y Shapiro-Wilk para normalidad de los residuos.

Obs	dfb.1	dfb.ral1	dfb.ral2	dfb.rCE2	dfb.rsp2	dffit	cov.r	cook.d	hat
2	0	1.18 *	0	4.75 *	-1.94 *	5.05 *	1.53 *	4.17 *	0.76 *

Cuadro 7.14: Posibles observaciones influyentes para diámetro a la altura del pecho en el modelo tipo D.

Obs	dfb,1	dfb,ral1	dfb,ral2	dfb,rFE2	dffit	cov,r	cook,d	hat
10	0	0,21	0	0,48	0,56	1,49 *	0,08	0,3
25	0,06	-0,04	-0,04	0,07	0,1	1,40 *	0	0,19

Cuadro 7.15: Posibles observaciones influyentes para el volumen total en el modelo tipo D.

Comparaciones Múltiple de medias: Contraste de Dunnet

Comparación	Estimación	Desvio Est.	t	p valor
1 - 0 = 0	2.9467	0.3325	8.863	1.05e-09
2 - 0 = 0	1.3475	0.3325	4.053	0.000614

Comparaciones Múltiple de medias: Contraste de Tukey

Comparación	Estimación	Desvio Est.	t	p valor
1 - 0 = 0	2.9467	0.3325	8.863	< 1e-04
2 - 0 = 0	1.3475	0.3325	4.053	0.000901
2 - 1 = 0	-1.5992	0.3325	-4.810	0.000115

Cuadro 7.16: Pruebas de comparación múltiple de Dunnet y Tukey para el diámetro a la altura del pecho en el modelo tipo D.

Comparaciones Múltiple de medias: Contraste de Dunnet

Comparación	Estimación	Desvio Est.	t	p valor
1 - 0 = 0	-4.5375	0.5024	-9.031	5.14e-10
2 - 0 = 0	-2.2351	0.5024	-4.449	0.000192

Comparaciones Múltiple de medias: Contraste de Tukey

Comparación	Estimación	Desvio Est.	t	p valor
1 - 0 = 0	-4.5375	0.5024	-9.031	<1e-04
2 - 0 = 0	-2.2351	0.5024	-4.449	0.000250
2 - 1 = 0	2.3024	0.5024	4.583	0.000235

Cuadro 7.17: Pruebas de comparación múltiple de Dunnet y Tukey para el volumen total en el modelo tipo D.