

Efecto de la poda, el distanciamiento y su interrelación sobre el crecimiento y la calidad forestal de plantas de *Prosopis alba Griseb.* en la zona de riego de Santiago del Estero

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Recursos Naturales

Martín Horacio Zárate

Ingeniero Forestal-Universidad Nacional de Santiago del Estero- 2006

Lugar de trabajo: Santiago del Estero



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

Javier Enrique Gyenge

Biólogo (Universidad Nacional de Córdoba)

Doctor en Biología (Universidad Nacional del Comahue)

Co-director de Tesis

María Elena Fernández

Licenciada en Ciencias Biológicas (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor en Biología (Universidad Nacional del Comahue)

Consejero de Estudios

Tomás Miguel Schlichter

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Forestales (Universidad Georg-August, Goettingen, Alemania)

JURADO DE TESIS

JURADO

Maria Cecilia Rousseaux

Ingeniero Agronomo (UBA)

PhD en Ciencias Agrarias (UBA)

JURADO

Roberto J. Fernández Aldúncin

Ing. Agrónomo (UBA)

PhD (Duke Univ.)

JURADO

Juan Agustín Alvarez Delahaye

Lic. en Gestión Ambiental (Universidad de Congreso)

PhD en Biología (Universidad Nacional del Comahue)

Fecha de defensa de la tesis: 20 de diciembre de 2017

Agradecimientos

A Javier Gyenge que, con paciencia, ideas, correcciones y muchísima confianza me acompañó desde un principio como director de tesis y aportó en la construcción de la misma y en mi formación profesional iniciando mis pasos como investigador. A María Elena Fernández y Tomas Schlichter quienes además de corregir, aportaron a definir el enfoque de este trabajo con todo su entusiasmo.

Al INTA que apoya y estimula la formación y perfeccionamiento de jóvenes profesionales.

También quisiera agradecer a mis compañeros de INTA por su apoyo, críticas y sugerencias.

Al Ing. Ftal. Sergio Roldan quien amistosamente me enseñó y ayudó en el armado de la base de datos, en la confección y el análisis de los modelos.

A la Dra. Marta Pece por las consultas e ideas para el análisis de datos.

A Raúl Cortez, Juan Coronel, Cesar Coronel, Luis Tevez y Aldo Chavez quienes durante más de 4 años me ayudaron en la toma de datos.

Al Ing. Mauricio Ewens y al Vivero Experimental Fernández por apoyar y colaborar en este y muchos ensayos de *Prosopis*.

A mi familia, amigos y a todas las personas que aportaron y apoyaron incondicionalmente.

Gracias a todos!

Resumen

A pesar del amplio uso que se realiza de *Prosopis alba Griseb*, en el caso de su cultivo, se desconoce el efecto de las intervenciones silvícolas apropiadas para esta especie. En esta tesis se utilizó un ensayo de densidades variables de plantación (tipo Nelder) al que se intervino con tratamientos de poda para evaluar el efecto en conjunto de estos factores sobre la calidad y crecimiento de la madera de algarrobo blanco. Los objetivos de esta tesis fueron: 1) caracterizar el desarrollo del dosel de los diferentes tratamientos a través del crecimiento del área foliar, 2) cuantificar el efecto de la poda en particular sobre la calidad de madera midiendo la producción de brotes epicórmicos, 3) evaluar el efecto de ambos tratamientos en la producción de madera de fuste, y 4) desarrollar un diagrama de manejo de rodal (DMR) que permita planificar las intervenciones según el objetivo productivo. Se concluyó que el área foliar a nivel de árbol fue afectada negativamente por la densidad y la poda. Sin embargo, a nivel rodal fue mayor en las mayores densidades de plantación, generando mayor interceptación de la radiación solar y una menor producción de brotes epicórmicos. En cuanto al crecimiento individual, los algarrobos crecieron más en los tratamientos de baja densidad de plantación. Si bien la poda disminuyó el crecimiento en el corto plazo, (8 años posteriores a la plantación) el tamaño de fuste final alcanzado por los árboles podados fue cercano a los no podados, sumándose el aspecto positivo de haberse concentrado el crecimiento en único eje. El DMR modelado permite estimar no solo la relación de tamaño de los individuos con la densidad de plantación, sino que también el volumen de fuste, el índice de densidad del rodal y el porcentaje de radiación interceptada en plantaciones jóvenes de algarrobo blanco.

Palabras clave: algarrobo blanco, área foliar, diagrama de manejo de rodal, brotes epicórmicos, silvicultura.

Abstract

Although afforestations with *Prosopis alba* Griseb. are widely used, the effects of appropriate silvicultural practices for their management are still unknown. With the aim to assess the effects of the silvicultural management on tree quality and growth, a trial of varying densities (Nelder) and combined pruning treatments were used. Objectives of this thesis were: 1) characterize canopy development on different treatments through leaf area growth, 2) quantify pruning effects on wood quality, estimated through epicormic shoot production, 3) assess the effect of both treatments on timber production, estimated through bole growth, and 4) develop a stand density management diagram (DMR) aimed to assist density control interventions. I concluded that tree-level leaf area was negatively affected by planting density and pruning. However, at stand level, leaf area was higher at greater planting densities, generating more interception of solar radiation and lower production of epicormic shoots. Regarding growth, trees grew more at lower planting densities. While pruning reduced early growth, at the end of the trial (8 years after planting) pruned trees reached same stem size as unpruned ones, having also,

the valuable characteristic of the single axis. DMR allowed to estimate tree-size/planting-density ratio at individual level, bole volume, stand density index and percentage of intercepted radiation in young *Prosopis alba* tree plantations.

Keywords: white carob tree, leaf area, stand management diagram, epicormic shoots, forestry.

Índice General

Resumen.....	4
Abstract	4
Índice General	6
Índice de Figuras	8
Índice de Gráficos	9
Abreviaturas y Siglas	11
1- Introducción	13
1.1. El efecto del manejo silvícola sobre el crecimiento.....	16
1.2. Sistema de Estudio	22
1.3. Modelo de interacciones del efecto de prácticas silvícolas sobre la calidad y la cantidad del producto	24
2- Hipótesis y objetivos del trabajo.....	25
2.1. Hipótesis.....	25
2.2. Objetivo General	26
2.2.1. Objetivos Específicos.....	26
3- Metodología	26
3.1. Área de estudio.....	26
3.2. Diseño del experimento	28
3.3. Tratamientos aplicados.....	29
3.4. Descripción de variables medidas	30
3.5. Construcción del Diagrama de Manejo del Rodal (DMR).....	38
3.6. Análisis de los datos	40
4- Resultados.....	41
4.1. Caracterización de la intercepción de la radiación solar de plantaciones de <i>P. alba</i> en relación a la densidad y área foliar del rodal.....	42
4.2. Producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y al ambiente lumínico	47
4.3. Análisis del efecto interactivo de intensidad de poda y densidad de individuos en la calidad y volumen de fuste maderable	54
4.4. Análisis de la relación densidad-tamaño del árbol.....	63

5 - Discusión	65
5.1. Caracterización de la interceptación de la radiación solar de plantaciones de <i>P. alba</i> en relación a la densidad y área foliar del rodal.....	65
5.2. Producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y la interceptación de la radiación	72
5.3. Determinación del efecto interactivo de intensidad de poda y densidad de individuos en la calidad y volumen de fuste maderable	79
6- Conclusiones y futuras investigaciones	88
7- Bibliografía	91

Índice de Tablas

Tabla 1. Medidas resumen de las distancias entre anillos del diseño Nelder empleado.....	29
Tabla 2. Modelos de tamaño-densidad, de isolíneas de volumen de fuste (VF_{ha}) e isolíneas de porcentaje de radiación interceptada (PRI).	39
Tabla 3. Valor de P del análisis de área foliar (AF) particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.” representa el factor densidad y “pda:dens”, la interacción.	42
Tabla 4. Incremento relativo del AF (Período 2008-2012).....	43
Tabla 5. Valor de P del análisis de índice de área foliar (IAF) particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.” representa el factor densidad y “pda:dens” la interacción entre ambos factores.	45
Tabla 6. Medias y desvío estándar del Índice de área foliar (IAF) de los distintos tratamientos (densidad de plantación y poda) estimado para el último año del ensayo (2012). Se destacan los valores máximos de IAF para cada tratamiento de poda.	45
Tabla 7. Valor de P del análisis del número de ramas podadas en función de densidad, particionado por año.	48
Tabla 8. Valor de P del análisis de la sección de ramas por árbol en función de la densidad de plantación, particionado por año.	49
Tabla 9. Medias y desvío estándar del peso seco acumulado de ramas	

(Psacc=kg/planta) por árbol, discriminado por densidad de plantación y año.	50
Tabla 10. Valor de P del análisis del volumen de fuste (VF) por árbol y por hectárea en función de densidad, poda y su interacción particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.”representa el factor densidad y “pda:dens” la interacción entre ambos factores.	54
Tabla 11. Valor de P del análisis de la sección normal a 1,3 m de altura de fuste (Se130) por árbol y por hectárea (área basal, AB) en función de densidad, poda y su interacción particionado por año.	56
Tabla 12. Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del diámetro a la altura del pecho (DAP, cm.) para cada densidad, en plantas con y sin poda. Las flechas indican si el cambio fue en aumento (verde), disminución (roja) o permaneció constante (amarillo)	58
Tabla 13. Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del volumen de fuste (VF, m ³ .) para cada densidad, en plantas con y sin poda. Las flechas indican si el cambio fue en aumento (verde), disminución (roja) o permaneció constante (amarillo).	59
Tabla 14. Valor de P del análisis del Esfuerzo de Poda para plantas con y sin poda por árbol en función de la densidad de plantación y el año.	61

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo hipotético de la respuesta de los árboles a la poda y el distanciamiento	24
Figura 2. Croquis del experimento de poda y densidad. Cada círculo, independientemente del tratamiento de poda, representa una densidad.....	28
<i>Figura 3. Imagen de plantas con poda indicando los diámetros para los cual se calcularon las secciones (S) y plantas sin podar indicando los diámetros en los múltiples ejes donde se calcularon las secciones (S) y el eje principal si este hubiera sido podada indicando la sección elegida (Se).</i>	32

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Precipitaciones (triángulos) y evapotranspiración potencial (Eto, cuadrados) acumulada mensual media y precipitaciones medias anuales de los últimos 6 años.	27
Gráfico 2. Área foliar (AF) promedio por árbol para cada densidad de plantación discriminado por año y práctica de poda. Línea marcando promedio máximo del AF alcanzado por plantas con poda (25 m ² /árbol).	43
Gráfico 3. Eficiencia del crecimiento del área foliar en función de la densidad.	44
Gráfico 4. Índice de área foliar (IAF) promedio para cada densidad de plantación discriminado por año y práctica de poda.	46
Gráfico 5. Porcentaje de luz interceptada (PRI) en función de la densidad y el grado de poda, para cada año de medición. La línea (- - -) denota el % 50 de interceptación de la luz.	47
Gráfico 6. Número de ramas podadas promedio por árbol en función de la densidad para cada año.	48
Gráfico 7. Número de ramas promedio por hectárea en función de la densidad de plantación para cada año.	48
Gráfico 8. Sección media de las ramas por árbol en función de la densidad para cada año de medición.	50
Gráfico 9. Peso seco promedio de ramas extraídas por árbol para cada densidad por año	51
Gráfico 10. Peso acumulado de ramas extraídas por hectárea para cada densidad y año.	52
Gráfico 11. Volumen de ramas (VR) promedio por individuo en función de la densidad por año (A) y volumen de rama promedio por hectárea por densidad y por año (B).	52
Gráfico 12. A- Número de ramas promedio por árbol en función del porcentaje de radiación interceptada (PRI), B- Número de ramas promedio por ha. En función del PRI, C- Peso seco promedio acumulado por árbol en función del PRI y D- Peso seco acumulado por ha. Promedio en función del PRI.	53

Gráfico 13. A- Volumen de fuste promedio por árbol sin poda en función de la densidad. B-Volumen de fuste promedio por árbol con poda en función de la densidad. C- Volumen de fuste promedio por ha sin poda en función de la densidad. D- Volumen de fuste promedio por ha. con poda en función de la densidad.	54
Gráfico 14. Sección normal y área basal de los distintos tratamientos. A – Sección normal en función de las densidades por año en plantas sin poda, B - Sección normal en función de las densidades por año en plantas podadas. C - Área basal en función de las densidades por año, plantas sin poda. D – Área basal en función de las densidades por año, plantas con poda	57
Gráfico 15.A- Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles con y sin poda (Cp. y Spa, respectivamente). B- ICA e IMA del volumen de fuste de árboles con y sin poda	60
Gráfico 16. Gráficos de puntos: Esfuerzo de poda ($V_{Fe}-V_F/V_{Fe}$) en plantas sin poda y esfuerzo de poda en las plantas con poda (V_R/V_F) en función de la densidad para cada año de medición.	61
Gráfico 17. A - Volumen de fuste elegido de plantas sin poda (cuadrado negro) y volumen de fuste único de las plantas con poda (cuadrado blanco) en el año 2012 en función de la densidad. B – Sección normal elegida de plantas sin poda (cuadrado negro) y sección normal de fuste único de las plantas con poda (cuadrado blanco) en el 2012 en función de la densidad.....	62
Gráfico 18. Gráfico de puntos del DAP promedio por densidad, volumen de fuste medio por hectárea y esfuerzo de poda medio acumulado hasta el 2012.	63
Gráfico 19. Evolución por año de la relación del diámetro medio cuadrático (D_g) y densidad (árboles/ha) de plantas sin poda (círculos negros) y con poda (círculos blanco). En cada gráfico está trazada la línea de autorraleo. (los ejes logarítmicos se transformaron en el eje opuesto en escala aritmética).	64
Gráfico 20. Diagrama de densidad de rodal. Relación del diámetro medio cuadrático (D_g) y densidad (árboles/ha ⁻¹), esto corresponde a los	

IDR (el valor IDR=1 corresponde a la línea de autorraleo). La relación de D_g y densidad con isolíneas de volumen de fuste en metros cúbicos por hectárea corresponde a líneas tipo: - - - - y las isolíneas de porcentaje de interceptación de la radiación corresponde a líneas tipo:..... El área sombreada de color gris corresponde a las densidades estudiadas en este trabajo, los valores restantes son extrapolados con los modelos. 87

Abreviaturas y Siglas

A

AF: Área foliar.
 AFE: Área foliar específica.
 AFex: Área foliar extraída.
 AR: Línea de auto-raleo.

B

BHR: Biomasa de hojas de ramas.
 BTH: Biomasa total de hojas.

D

D.E.: Desvío estándar.
 D100: Diámetro del árbol a 100 cm. del suelo.
 D130: Diámetro del árbol a 130 cm. del suelo.
 D20: Diámetro del árbol a 20 cm. del suelo.
 DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.).
 dens: Densidad,
 D_g : Diámetro medio cuadrático.
 DMR: Diagrama de manejo del rodal.

E

EP: Esfuerzo de poda.

F

FI: Fracción interceptada.

G

G: Área basal.

H

ha: Hectárea.
 Hf: Altura del fuste.
 Ht: Altura total del árbol.

I

IAF: Índice de área foliar.
 ICA: Incremento corriente anual.
 IDR: Índice de densidad del rodal.
 IMA: Incremento medio anual.

K

K: Coeficiente de extinción de luz.

L

L_r : Largo de rama.

LSD: Least significant difference
(Diferencia mínima significativa).

M

m²: Metros cuadrados.

m³: Metros cúbicos.

MLG: Modelo lineal
generalizado.

N

N: Densidad o número de pies
por hectárea.

N.E.A.: Noreste Argentino.

NR: Número de ramas.

P

pda: Poda.

plt: Planta

PRI: Porcentaje de radiación
interceptada.

psacc: Pesos seco acumulado de
ramas.

S

S: Sección del fuste del árbol.

S100: Sección del fuste a 100 cm.
del suelo.

S130: Sección del fuste a 130 cm.
del suelo.

S20: Sección del fuste a 20 cm.
de suelo.

S200: Sección del fuste a 200 cm.
del suelo.

Se: Sección de fuste elegido del
árbol.

Sr: Sección de la rama

V

VF: Volumen de fuste.

Vfe: Volumen del fuste elegido.

VR: Volumen de ramas.

Vt: Volumen total

1- Introducción

El productor forestal se vale de labores silvícolas tales como la poda, el raleo, la fertilización, el riego, el manejo de enfermedades y plagas, y el empleo de material genético apropiado, entre otras acciones, para maximizar la producción y lograr madera de calidad. De las labores mencionadas, teniendo en cuenta la producción forestal en Argentina, las prácticas más usuales en el marco de la producción forestal, se relacionan con el manejo de la densidad de las plantaciones y la poda de ramas. Estas prácticas tienen como objetivo concentrar el crecimiento del rodal en pocos individuos seleccionados, y reducir la cantidad y tamaño de los nudos producidos por las ramas podadas mejorando así, la calidad de la madera producida.

En general, en nuestro país, el desarrollo de normas de manejo silvícola, entendidas como la determinación del momento y esfuerzo óptimos de una práctica forestal, se ha producido en las zonas en donde se cultivan especies de rápido crecimiento, compuesta en su mayoría, por especies exóticas. Por ejemplo, se cuenta con caracterizaciones de calidades de sitio y curvas de crecimiento para *Pseudotsuga menziesii* (Pino Oregón) y *Pinus ponderosa* (Pino ponderosa) aplicables a las condiciones del N.O. de la Patagonia, como así también estudios económicos para los cuales se conoce el efecto de tratamientos silvícolas y el comportamiento de esta última especie bajo distintas condiciones de sitio (Andenmatten and Letourneau 1998). Actualmente se han publicado nuevos manuales técnicos que, además de tener en cuenta cuestiones productivas, también aportan información teniendo en cuenta el impacto ambiental y social de las plantaciones (Chauchard et al. 2015). Para el género *Pinus* en el N.E. de Argentina (*P. taeda*, *P. elliotti* y varios híbridos) se pueden mencionar varios estudios en los que se analizan la interacción entre la poda y la densidad de plantación sobre los incrementos de la biomasa, así como también, el ambiente lumínico que determinan las

plantaciones de pinos sometidas a distintos grados de intervención silvícola cuando el objetivo es el desarrollo de sistemas silvopastoriles, entre otros aspectos (Costas et al. 2002, 2007, Fassola et al. 2002, Pérez et al. 2006, Pachas et al. 2009). Este cúmulo de conocimiento ha permitido el desarrollo de modelos empíricos de simulación de la producción y rendimiento de distintas especies, tales como el modelo Piltriquitron V1.0 (Andenmatten and Letourneau 2004) y PlaForNEA (www.plafornea.com.ar). Asimismo, para la región del N.E de Argentina, se han desarrollado estudios sobre el efecto de la poda, el raleo, la fertilización, y otras prácticas silvícolas que tienen en cuenta las interacciones entre tratamientos, sobre la productividad de especies del género *Eucalyptus*. Por ejemplo, determinaron en un experimento que la alta densidad de plantación no afecta la calidad de la madera en cuanto a su densidad, y que el raleo, afecta significativamente el área foliar del rodal (Muñoz et al. 2008, 2010). Así, se han estandarizado las labores silvícolas en manuales de buenas prácticas para el cultivo de eucaliptos en la zona del N.E.A. (Carpineti et al. 1995) o de labores silvícolas en general, lo que facilita la difusión de las normas de manejo más adecuadas. De manera contraria, existe un escaso desarrollo de normas de manejo silvícola para las especies forestales nativas plausibles de ser cultivadas (con la excepción de *Araucaria angustifolia* contemplada dentro de la plataforma de simulación PlaForNEA). Esto es evidente en el caso de especies nativas de la Región Chaqueña argentina, y en particular, para las especies del género *Prosopis* (algarrobos). Entre los estudios existentes, es posible mencionar un trabajo en el que se explica el tratamiento pre-germinativo aplicable a las semillas, y en donde también se brindan recomendaciones sobre la densidad de árboles para conformar sistemas agroforestales con *Prosopis alba*, *P. chilensis*, *P. flexuosa* y *P. nigra* (Marmillon 1986). En otro estudio, se evaluó la influencia de la poda en *P. alba*, llegando a la conclusión de que las podas deben ser de baja intensidad para evitar una

disminución en el crecimiento del fuste y la aparición de brotes epicórmicos (ramas desarrolladas en la porción inferior del fuste, (Atanasio 2014). Y otros mencionan una rápida respuesta en el incremento del crecimiento de las ramas en respuesta a la poda (Alvarez et al. 2013a). En cuanto al conocimiento de la productividad forestal de las especies de *Prosopis*, se cuenta con algunos ejemplos como los estudios en vinal (*P. ruscifolia*) con turnos de corta estimados en 25 años (Juarez de Galindez et al. 2005, Gimenes et al. 2009) o en algarrobo blanco (*P. alba*), que para esta misma edad podría alcanzar un diámetro aceptable pero sólo bajo un manejo adecuado (Gimenez et al. 1998, Costas et al. 2007). En cuanto a información sobre la silvicultura de este género, existe información dispar que varía desde estudios en ensayos de vivero con *P. alba* (Guzman et al. 2011), funciones de volumen de *P. caldenia* (Chauchard et al. 2015), productividad de *P. alba* de diferentes orígenes geográficos (Ledesma et al. 2008) y algunos modelos de crecimiento de *P. alba* (Juarez de Galindez et al. 2005), no teniendo información sobre la posible interacción en el manejo combinado de densidad de plantación e intensidad de poda, ni de la relación tamaño-densidad lograda en diagramas de manejo silvícola. Estos diagramas permiten de manera general fijar metas productivas y tener una estimación del estado cuantitativo del rodal ya sea en función de la densidad o del tamaño medio de los árboles, como por ejemplo el índice de Reineke, pudiendo además, inferir la cobertura y la producción potencial de un rodal en diferentes momentos de ocupación (este aspecto se desarrollará más adelante). Finalmente, existe una relación máxima entre tamaño medio y cantidad de los individuos del rodal, por lo que el crecimiento en tamaño sólo se puede producir ante la mortandad de parte de la población, proceso denominado autoraleo en el caso de bosques monoespecíficos, De esa manera, es posible estimar la máxima cantidad de árboles que podríamos tener de un determinado tamaño.

En el caso particular del algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.), se desconoce

la aplicación correcta de distintas prácticas silvícolas, en particular, la respuesta en crecimiento y forma del fuste a la intensidad y momento de aplicación de la poda y el distanciamiento de plantación. Esta especie es muy valorada y promocionada como especie forestal para la producción de madera de calidad, tanto por su valor económico y ambiental, como por el valor social a nivel regional y en otras partes del mundo. Es importante recalcar que varias de estas especies pueden erigirse como una importante fuente de proteínas, biomasa y nitrógeno, destacándose además, por su adaptabilidad a condiciones de aridez y semi-aridez (Felker and Bandurski 1979, Felker et al. 1984). Por todo ello, y poniendo énfasis en la producción netamente forestal, es necesario determinar el efecto que tendrían distintos tratamientos silvícolas sobre el crecimiento y la calidad de su madera.

1.1.El efecto del manejo silvícola sobre el crecimiento

La poda como tratamiento silvicultural consiste en la remoción o eliminación de parte de la copa viva para disminuir la cantidad de ramas laterales maximizando la producción de madera libre de nudos (Montagu and Kearney 2003, Venture et al. 2004). Así, se busca mejorar la calidad de la madera teniendo como objetivo su industrialización en la construcción de muebles. Sin embargo, este tratamiento debe ser realizado en una intensidad y frecuencia adecuada, ya que un exceso de poda puede traer aparejado una reducción del crecimiento y de la calidad por pérdida de forma del fuste, (Pinkard and Beadle 2000). En términos generales, se recomienda podar las ramas antes de que alcancen los 2,5 a 3 cm de diámetro para asegurar una buena cicatrización de la herida. De esta manera, se busca no afectar la calidad de la madera debido al nudo que queda como marca en el lugar donde se encontraba la rama originalmente (Hawley and Smith 1972).

La extracción de follaje produce distintos efectos sobre las plantas. Por un lado,

significa una disminución del área fotosintética, y por otro puede aumentar la disponibilidad de recursos (agua y nutrientes) para las hojas que quedan. El equilibrio, o la capacidad de cada especie de compensar ambos efectos, determinan umbrales específicos de esfuerzo y momento de intervención. Por ejemplo, en *Eucalyptus globulus*, una poda de hasta el 50% de la copa no produjo mermas en el crecimiento (Pinkard 2003), y en *P. ponderosa* la respuesta a una poda de similar magnitud, el crecimiento fue negativamente influenciado al incrementarse el estrés hídrico por una mayor demanda evaporativa de los árboles intervenidos indicando baja capacidad de esta especie para compensar la pérdida de área foliar (Gyenge et al. 2009).

Como respuestas generales a la poda, se han encontrado dos patrones no excluyentes entre sí, los que consisten en: (i) un incremento transitorio de la capacidad fotosintética del follaje remanente, y (ii) un rápido incremento de nueva área foliar. En este sentido, el incremento de la tasa fotosintética del follaje remanente es una reacción fisiológica que ocurre en algunas especies después de algún evento de defoliación, cuya magnitud depende de la intensidad de la defoliación (poda), del estado sanitario de las plantas y de la capacidad hidráulica de la especie de utilizar el sistema conductivo para alimentar el área foliar remanente (compensación hidráulica) (Pinkard et al. 2007). Por otro lado, se ha observado un crecimiento exacerbado de ramas y follaje como respuesta compensatoria (capacidad de compensar el área foliar perdida), generando el efecto opuesto al deseado con las podas. Es posible encontrar diversos estudios que analizan la magnitud de estas respuestas ante un evento de poda. Por ejemplo, la tasa de fotosíntesis neta de *Pinus greggii* se incrementó entre un 50 y 80% en los primeros dos meses como respuesta a la poda del 25 y 50% del tallo con follaje, observándose también una promoción del crecimiento del área foliar (Cetina-Alcalá et al. 2001). En *P. silvestris* (Sundberg et al. 1993), se observó un incremento del 30% en la fotosíntesis y 40% en el

área foliar luego de una poda. En *Populus sp.*, (Tschaplinski and Blake 1995) registraron una ganancia de 60% en el área foliar un año después de una poda del 20% del tallo. Más allá del tipo de compensación en la fijación de carbono (incremento de la capacidad de fijar carbono por unidad de superficie, o capacidad de generar superficie foliar de manera rápida), aquellas especies con bajas capacidades de respuesta a nivel foliar (individual o del conjunto de hojas) demuestran una mayor pérdida de productividad ante un mismo esfuerzo de poda que las especies que posean algún sistema de compensación. Esto determina la necesidad de conocer cuáles son los límites de poda en los que las distintas especies logran compensar las pérdidas de área foliar y así, no generar mermas en la producción.

Dentro de las especies que muestran la capacidad de compensar el área foliar perdida (respuesta compensatoria), se encuentran aquellas que lo hacen por medio de la generación profusa de ramas nuevas o brotes epicórmicos (Blum 1963). Se define como ramas o brotes epicórmicos a aquellas estructuras desarrolladas a partir de cualquiera de los brotes adventicios o yemas latentes situados a lo largo del tronco del árbol, que se forman o se liberan en respuesta a varios tipos de estímulos. Estos estímulos generan una variación de la cantidad o la distribución de las auxinas producidas por el árbol que desencadenan dicho desarrollo. Entre otros estímulos, se mencionan a factores externos como el cambio en el ambiente lumínico (Büsgen, M., & Münch 1929, Zimmerman and Brown 1971, Pallardy and Kozlowski 2008, Otoda and Ishii 2009), la temperatura (O'Hara et al. 2008) o internos como la concentración de auxinas (Takiya 2010), moderados por la variabilidad genética intra e interespecífica (Bowersox and Ward 1968). Se menciona en otro trabajo (Meier et al. 2012), que estos brotes se desarrollan luego de un evento de estrés y resultan en un reemplazo de la biomasa perdida, o en el caso de falta de algún disturbio, por la dinámica misma de la hormona de la planta. Dicha brotación es

en última instancia, una respuesta a un desequilibrio fisiológico en la copa del árbol que requiere una expansión de área foliar ya sea para aumentar la probabilidad de supervivencia de los árboles o para maximizar la captura de recursos. Otras especies simplemente muestran una muy baja capacidad de producirlos. Por ejemplo, en *Larix gmeliniivar. japonica x L. kaempferi* el número de brotes epicórmicos aumentó recién después de una poda muy severa (99% de follaje eliminado) (Takiya 2010).

En el caso de la poda, no sólo el aumento de luz podría estimular la formación de brotes epicórmicos sino también el daño mecánico causado que inicia una respuesta de estrés estimulando a las yemas más cercanas a los daños (Takiya 2010). Este autor también expone que la aparición de brotes epicórmicos se atribuye a la ruptura de la dominancia apical, ya que los brotes apicales son los que controlan la brotación lateral por medio de la producción de auxinas. También el aumento de la intensidad de luz por la poda podría sumar efecto a la pérdida de dominancia apical, ya que la luz descompone las auxinas que fluyen basípetamente desde los ápices (Wignall et al. 1987).

Los brotes epicórmicos en muchos casos, pueden competir con el eje principal dando como resultado un árbol con múltiples tallos. Esto afecta directamente a la calidad final del producto en términos de producción de madera, al aumentar el número de ejes del árbol y distribuir el crecimiento total de madera entre diversos fustes (Kerr and Harmer 2001). Estos tipos de árboles, generalmente, expresan un bajo nivel de crecimiento secundario (crecimiento en diámetro) en comparación con el crecimiento primario (crecimiento en altura), ya que la altura no se ve afectada por la formación de brotes epicórmicos (Nicolini et al. 2001).

A manera de síntesis, todas las especies tienen un nivel de poda que puede afectar negativamente el crecimiento, por ejemplo se estima que en eucaliptos y acacias ocurre con niveles de extracción de área foliar de entre el 40 y el 50%, y en coníferas entre 25 y

40% de la longitud de copa viva (Pinkard and Beadle 2000).

Por otro lado, el distanciamiento entre individuos, que determina la densidad de plantación, se elige en función del objetivo de la misma. En este sentido, se requiere una mayor densidad de plantación para la obtención de fustes más rectos que para la producción de otro tipo de productos (semillas, frutos, brotes, etc.). En plantaciones comerciales con destino a producir madera, se aconseja plantar un número de árboles relativamente alto de individuos al inicio de la forestación para asegurar un número mínimo de plantas establecidas y así, generar las condiciones ambientales al inicio del crecimiento que asegure el desarrollo de tallos de forma aceptable. Luego, la densidad de árboles del rodal se regula con raleos (extracción de árboles) siguiendo dos objetivos: permitir un mayor desarrollo de los individuos remanentes por disminución de la competencia y a la vez, seleccionar las mejores plantas (Hawley and Smith 1972). El manejo del distanciamiento entre plantas (distanciamiento inicial y raleo) junto con la poda permiten regular el crecimiento en altura y diámetro del fuste, como así también, minimizar el crecimiento de ramas en las porciones de tallo destinados a la producción de madera de mayor calidad (libre de nudos). Con *Quercus petraea* (especie con gran capacidad de brotación) se probó que es posible realizar una disminución de la densidad de individuos evitando también el desarrollo de brotes, matando los individuos seleccionados mediante un anillado (Reque and Bravo 2007). Así, la permanencia de los árboles muertos no generó un ambiente propicio para el rebrote, y en cambio disminuyó la competencia entre individuos, liberando recursos al disminuir la densidad de árboles vivos.

Existe una fuerte relación negativa entre la densidad de individuos y la biomasa de los mismos dentro de un determinado rodal, cuantificada por la “la ley de Yoda” o “ley de los $-3/2$ ” (Monserud et al. 2005). Esta relación verifica el proceso dinámico de

disminución del número de árboles en un rodal debido a los procesos de competencia y posterior aumento del tamaño o volumen de los individuos sobrevivientes. En rodales coetáneos se distinguen tres etapas en el desarrollo de las plantas. La fase inicial de desarrollo en donde los árboles no ocupan todo el espacio, la competencia intraespecífica es muy baja o nula siendo en término general mayor la competencia interespecífica. Una segunda etapa, caracterizada por el inicio de la competencia intraespecífica, donde se verifica un cierre del dosel arbóreo que produce un cambio del ambiente lumínico bajo el mismo. En esta etapa aumenta el tamaño medio de los árboles pero no disminuye la densidad, aunque es posible observar la muerte de las plantas más oprimidas o menos desarrolladas. En la tercera etapa, el sitio es completamente ocupado y la densidad alcanza su máximo respecto al tamaño de los árboles, por lo que el desarrollo de los individuos dependerá de la liberación de espacio dado por la muerte de los suprimidos. El índice de densidad de rodal de Reineke fue la primera aproximación empírica de esta ley, al haber encontrado un valor cercano a $-3/2$ para varias especies (Reineke 1933).

El raleo permite regular la competencia intraespecífica cuando este alcanza valores de índices de densidades tales que disminuye el crecimiento del conjunto. Por ejemplo en *P. radiata*, se observó un incremento de la productividad de los individuos remanentes debido a la aplicación de esta práctica aún seis años después de intervenido el rodal (Espinosa et al. 1994). Dada las limitaciones ecofisiológicas de cada especie, no existe una respuesta universal a un mismo esfuerzo de raleo. Por ejemplo, rodales de álamo y abedul aumentaron su crecimiento en un 200%, y fresnos y robles mostraron un comportamiento intermedio (más de 100%), por otra parte abetos y pinos mostraron la menor respuesta (un 80% de incremento) a raleos de 15, 30 y 45% del volumen del rodal (Juodvalkis et al. 2005). De esta manera, si bien el incremento del diámetro a la altura del pecho (DAP) se correlacionó positivamente con la intensidad del raleo, cada especie

respondió de manera particular (Juodvalkis et al. 2005). En ensayos con *Nothofagus pumilio* pudo observarse un incremento de la productividad con pérdida de la calidad. En este sentido, otros midieron incrementos volumétricos en un rodal con raleo de entre 25 a 32% del área basal, pero la calidad de fuste fue disminuida por bifurcación y ramificación de los fustes (Pastur et al. 2001). Finalmente, el estatus social o nivel de competencia también puede interactuar con el esfuerzo de raleo. Por ejemplo, se observó en árboles de madera dura (*Quercus* sp, *Acer* sp, *Fagus* sp, *Betula* sp, entre otras) del oeste de Virginia, Estados Unidos, que los árboles dominantes y codominantes generaron una menor cantidad de brotes que los oprimidos e intermedios en respuesta al raleo (Trimble and Seegrist 1973). De esta manera, la disminución de la densidad podría afectar positiva (en cuanto al volumen de madera producido) o negativamente (por generación de brotes) a la calidad de la madera producida dependiendo de la respuesta ecofisiológica de la especie en estudio.

1.2. Sistema de Estudio

El algarrobo blanco es una especie forestal nativa de la región Chaqueña semiárida, considerada a través de estudios como un complejo sistema de especies taxonómicas, que por hibridación resulta en un sin número de formas que ocupan diversos nichos en más de la mitad del territorio continental argentino, extendiéndose en un continuo, hacia Paraguay, Bolivia, Chile y Perú (Verga et al. 2009). Es considerada como una de las especies de mayor valor comercial en el mercado de madera aserrada dentro de esta región. Asimismo, es altamente apreciada como productora de forraje y en la actualidad es reconocido como alimento apto para humanos por sus cualidades tradicionales, ancestrales y nutritivas por el código alimentario argentino a través de la resolución conjunta SPReI N° 56 y SAGyP N° 538. Estos atributos tornan a la especie como una de los más valiosos recursos naturales de la región Semiárida Argentina

(Gimenez et al. 1998) y estimularon a que este cultivo se considere una alternativa productiva muy conveniente.

Otros beneficios que se pueden mencionar es su uso para combustible como leña y carbón, sus flores aportando néctar y polen para la actividad apícola. Y está en auge las plantaciones como parte del componente arbóreo de sistemas silvopastoriles y agroforestales.

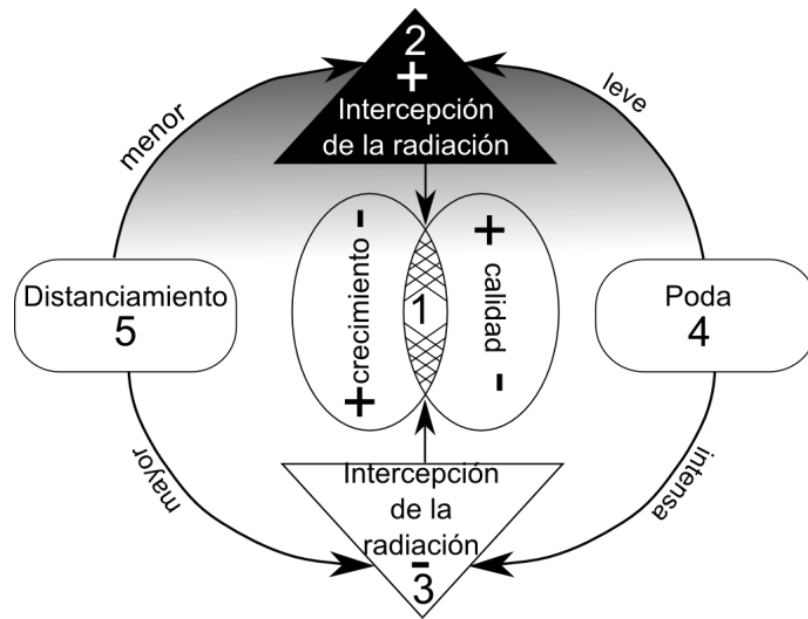
Tal es así que la forestación con esta especie es promocionada a través de la Ley Nacional N° 25.080 (y su prórroga, Ley 26.432), siendo el área de mayor potencial para su plantación la de riego del Río Dulce en la provincia de Santiago del Estero, por la disponibilidad de una napa freática constante, y muchas de las plantaciones que se plantearon como productoras de madera de calidad, son ajustadas mediante raleo para acondicionarlas al manejo ganadero hasta llegar a su turno de corta.

El cultivo de la especie es relativamente reciente, y a pesar de que se han logrado avances en el ajuste de paquetes tecnológicos para su manejo, continúan siendo de difícil resolución los inconvenientes en el manejo de la forma y brotes epicórmicos de las plantas. El algarrobo tiene un modelo de ramificación plagiótropo por sustitución y su modelo arquitectural se ajusta al modelo de Troll (Gimenez et al. 1998). Así, el fuste se forma por la sucesión de órdenes de ramificación sucesivos en cada uno de los cuales se generan 3 ramas, generalmente una aborta y una de las restantes toma dirección ortótropa para continuar con la formación del tronco (Moglia and Gimenez 2006). Como resultado de este modelo de ramificación, las plantas jóvenes de *Prosopis* creciendo en condiciones de plena luz, sin manejo, presentan ramificación abundante, siendo difícil la individualización de un eje líder. Algunos estudios sobre esta especie mostraron un efecto positivo del manejo de la densidad de plantación y la poda sobre la calidad y el crecimiento del fuste siendo determinantes la intensidad y oportunidad de poda adecuadas

(Ewens et al. 2005).

1.3. Modelo de interacciones del efecto de prácticas silvícolas sobre la calidad y la cantidad del producto

Figura 1. Modelo hipotético de la respuesta de los árboles a la poda y el distanciamiento



De acuerdo a los antecedentes existentes, este trabajo plantea un modelo hipotético (fig. 1) de respuesta de los árboles al manejo silvícola tendiente a la producción de madera aserrable de máxima calidad. Esta calidad supone la disminución del número y tamaño de los nudos y aumento del crecimiento (mayor volumen) en un único fuste (1). La producción de brotes epicórmicos disminuyen ambos aspectos, ya que compiten con el fuste por recursos y a la vez, generan nudos que disminuyen su calidad final. Tanto la poda (4) como las diferencias entre el distanciamiento entre plantas (5) generan cambios en la intercepción de la radiación por parte del dosel (2 y 3), lo que directa o indirectamente, permitiría el desarrollo de brotes epicórmicos. Así, a una mayor intercepción de la radiación por el dosel determinaría baja disponibilidad de radiación (2) como producto de un bajo distanciamiento entre individuos y/o podas leves, no sería

propicio para el desarrollo de brotes lo que aumentaría la calidad del fuste, pero tampoco se generarían altos crecimientos individuales por la competencia intraespecífica. El efecto contrario se lograría con un sistema con alta disponibilidad de radiación debido a un dosel con menor intercepción (3) en donde se podría observar una alta productividad del fuste como así también, de los brotes. Es conocido que la generación de brotes epicórmicos depende de la magnitud de radiación solar que alcanza la zona del fuste, además de la inducción que pueda generarse ante un exceso de remoción de área foliar (poda, 4). Es decir, como producto de una poda leve, la cantidad de radiación solar que llegue al fuste será menor (debido a un dosel más denso) y por lo tanto, no se induciría la generación de brotes epicórmicos que afectarían negativamente la calidad. Una poda intensa podría inducir la generación de brotes epicórmicos afectando la calidad del fuste. Dado que la radiación solar que alcanza el fuste depende del área foliar del dosel arbóreo y su cobertura, una reducción exacerbada del número de individuos o mayor distanciamiento entre estos (5) podría inducir la producción de brotes epicórmicos. Sin embargo, la disminución de la competencia intraespecífica también generaría una mayor disponibilidad de recursos que permitiría incrementar la productividad del árbol. De acuerdo a este modelo hipotético existirían tratamientos de manejo posibles (combinaciones particulares de densidades y niveles de poda) que permiten optimizar los objetivos productivos.

2- Hipótesis y objetivos del trabajo

2.1. Hipótesis: Existen combinaciones particulares de nivel de poda y densidad de plantación que optimizan el crecimiento y minimizan la brotación de nuevas ramas o brotes epicórmicos debido a la interacción entre la radiación incidente (factor ambiental externo a la planta) e intensidad de poda (factor fisiológico, interno) la cual determina que:

- A mayor intercepción de la radiación (mas sombreado), aumenta la biomasa de ramas podadas que genera respuesta compensatoria (brotación de ramas nuevas o brotes epicórmicos) en la zona de fuste.

- A menor intercepción de la radiación (menos sombreado), disminuye la biomasa de ramas podadas que disminuye el crecimiento del fuste.

2.2 Objetivo General

Determinar el efecto de la poda y el distanciamiento de plantación que maximicen la calidad y el volumen del fuste aprovechable en *Prosopis alba* en el área de riego de Santiago del Estero.

2.2.1. Objetivos Específicos

1. Caracterizar la intercepción de la radiación solar de plantaciones de *P. alba* en relación a la densidad y área foliar del rodal.

2. Determinar la producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y el distanciamiento entre plantas.

3. Determinar el efecto interactivo de intensidad de poda y distanciamiento de individuos en la calidad y volumen de fuste maderable.

4. Modelar un diagrama de manejo de rodal junto a otras funciones que estimen el índice de densidad relativa (IDR), el volumen de fuste (VF) y la proporción de radiación interceptada (PRI).

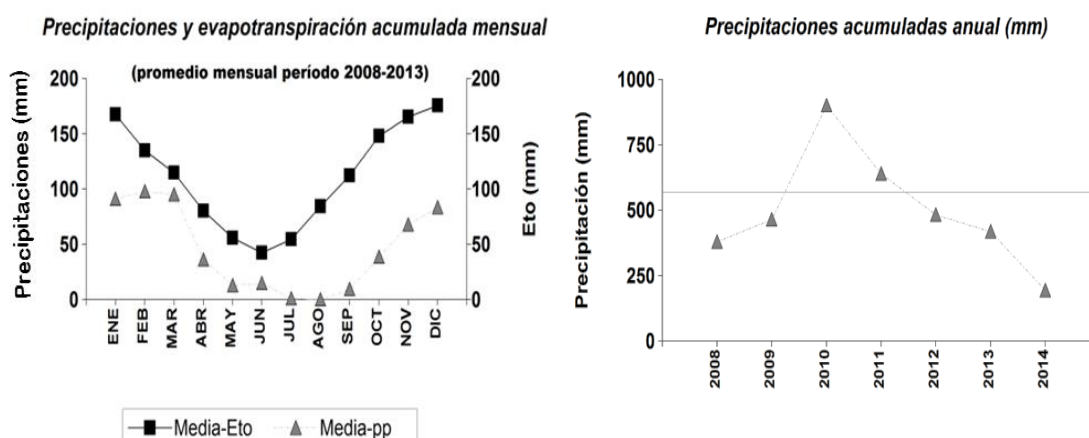
3- Metodología

3.1. Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en un ensayo de densidad variable basado en un diseño de plantación tipo sistemático Nelder de individuos de *Prosopis alba* instalado en 2005. El mismo se encuentra en el predio de la Estación Experimental Fernández, zona

de riego del Río Dulce, provincia de Santiago del Estero, Argentina ($27^{\circ}56'19.95''S$; $63^{\circ}52'39.62''O$). Es importante recalcar que si bien es factible realizar un riego, sólo se realizó uno en el momento de la plantación (riego de asiento). El suelo pertenece al tipo Haplustolesarídicos, subgrupo caracterizado por la secuencia de horizontes: A, AC, C. Son suelos desarrollados sobre materiales eólicos de textura franca a franco arenosa. En el perfil se manifiestan sales solubles en la base del horizonte AC y existen napa freáticas cercanas a la superficie (Angueira and Prieto 2007). Algunas medidas preliminares de la napa freática dentro de este ensayo determinaron la que la profundidad de la misma se situó en valores de entre 2,5 m (verano) a 4 m (invierno) de profundidad (solo existe mediciones del año 2010). El clima es semiárido con precipitaciones anuales medias de 570 mm (1974-2005) con un balance hídrico negativo (evapotranspiración potencial mayor a la precipitación media en todos los meses del año, figura 2), temperatura media de $20,2^{\circ}C$, con una máxima y mínima de $28,1^{\circ}$ y $12,7^{\circ}C$ respectivamente (datos promedio del período de estudio). Las limitaciones climáticas, la relativamente baja retención de humedad en el suelo y la alta variabilidad de la precipitación anual determinan que la aptitud natural del sitio sea para uso ganadero. Sin embargo la disponibilidad de agua del sistema de riego del Río Dulce los hace aptos estos sitios para la agricultura.

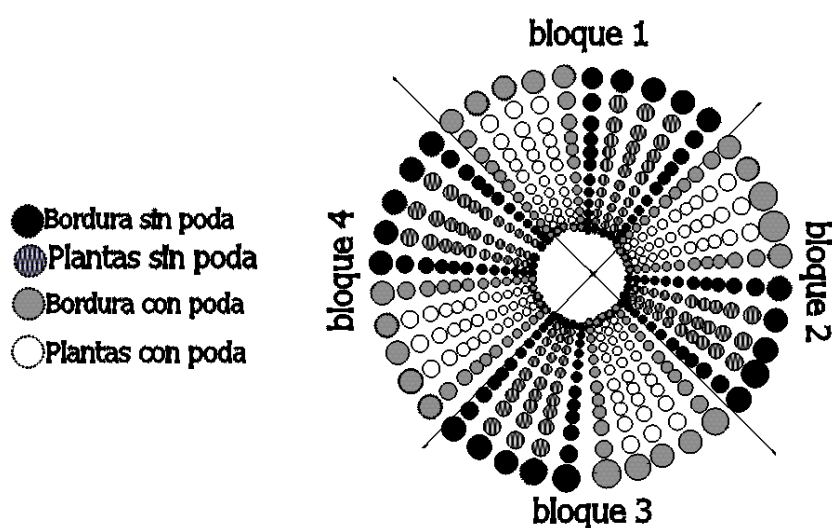
Gráfico 1. Precipitaciones (triángulos) y evapotranspiración potencial (Eto, cuadrados) acumulada mensual media y precipitaciones medias anuales de los últimos 6 años.



3.2. Diseño del experimento

El diseño de ensayo tipo *Nelder* consiste en anillos concéntricos cuyos radios conectan el centro con el anillo más lejano. En cada intersección de radios y arcos se planta un árbol (figura 2). Esto crea densidades variables a través de la longitud de los radios. El empleo de este diseño elimina la necesidad de separar en ensayos individuales de densidad de plantación, lo cual implicaría una mayor superficie de plantación y mayores costos (Parrott et al. 2012).

Figura 2. Croquis del experimento de poda y densidad. Cada círculo, independientemente del tratamiento de poda, representa una densidad.



El

ensayo Nelder de *P. alba* cuenta con 480 árboles distribuidos en 40 radios (ángulo de 9°) y 12 anillos, lo que proporciona la posibilidad de analizar 10 densidades de plantación variables entre 450 y 4500 plt/ha., considerando bordura al anillo 1 y 12. Los 40 radios se dividieron en grupos de a 10 generando cuatro bloques. Cada bloque se subdividió en los tratamientos de poda y no poda (5 radios de cada bloque). Las mediciones se

realizaron en los tres radios internos de cada grupo, dejando los radios externos como bordura. Por lo tanto, en total se midieron 240 árboles quedando como bordura otros 240.

Tabla 1. Medidas resumen de las distancias entre anillos del diseño Nelder empleado.

Nº anillo	Densidad	Distancia desde el centro (m)	Distancia al otro anillo (m)
1	bordura	8,5	0
2	4500	10,0	1,50
3	4000	11,5	1,50
4	3000	13,2	1,73
5	2200	15,2	1,98
6	1700	17,5	2,28
7	1300	20,1	2,62
8	1000	23,1	3,02
9	750	26,6	3,47
10	560	30,6	3,99
11	450	35,2	4,59
12	bordura	40,5	5,28

3.3. Tratamientos aplicados

Cada planta fue sometida a dos factores: densidad de plantación (generado por el diseño de plantación) y poda (con y sin poda, siguiendo el criterio que se explicita a continuación).

A partir del diseño de plantación se generaron 10 tratamientos de densidad: 450, 560, 750, 1000, 1300, 1700, 2200, 3000, 4000 y 4500 plt/ha.

Para establecer los criterios de poda, se tomó en cuenta la experiencia local alcanzada por el mantenimiento de otros ensayos y plantaciones comerciales de algarrobo blanco. La poda se realizó dos veces por año (julio y enero) buscando como objetivo lograr un fuste de más de dos metros de altura libre de ramas (Kees and Michela 2015) y distribuir la intensidad de poda en dos momentos para poder aplicar podas sistemáticas no superiores al 30% de la altura de las plantas, esta recomendación se atribuye que superada esta altura podría afectar el crecimiento y/o la calidad de la madera (Atanasio 2014). La primer poda se realizó en el año 2007 (poda de formación), la cual consistió en

la extracción de algún tallo para disminuir la bifurcación, ramitas quebradas, entre otras. No se cuenta con un registro de esta práctica. A partir del año 2008 comenzaron las podas de conducción, finalizando el estudio en el año 2012. En dicho año final no se realizó ninguna poda debido a que los fustes no generaron ningún brote epicórmico luego de la poda del año 2010, coincidente con lo expuesto por Atanasio (2014) que luego de una segunda poda el número de brotes epicórmicos se redujo notablemente (no más de 1 brote por planta).

En cada poda se contaron, midieron y pesaron las ramas extraídas de las plantas podadas, determinando el número de ramas (NR). No se contaron el NR epicórmicas en las plantas no podadas por cuestiones operativas y presupuestarias.

Se definió como rama que debe podarse a la que cumplía con algunos de los siguientes criterios:

- Tener un diámetro basal menor a 2,5-3 cm, situarse en el primer tercio de la altura total del árbol y/o crecer con dirección hipogea (hacia abajo).
- Competir con el eje principal.
- Estar enferma y/o quebrada, lo cual representa una posible entrada de patógenos.
- Ser muy vigorosa, brotando como respuesta a disturbios (chupones).

3.4. Descripción de variables medidas

El ensayo se midió durante los años 2008 a 2012, con una interrupción en el año 2011 por cuestiones operativas.

α - Variable a nivel de individuo: En cada momento de medición se cuantificaron las siguientes variables:

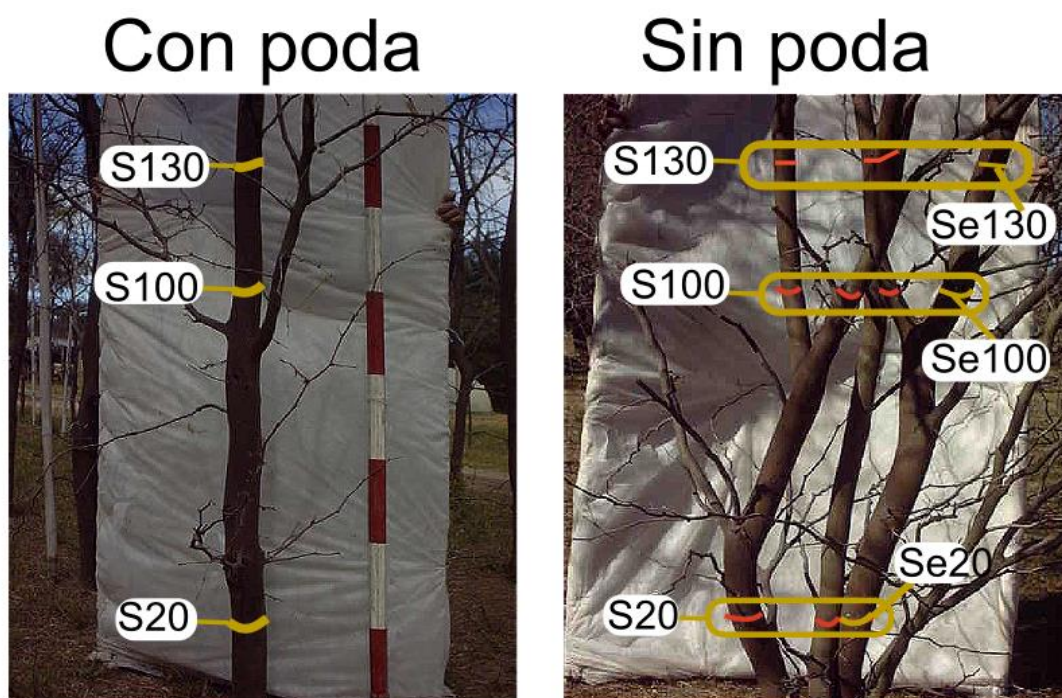
Diámetro: se midió diámetro del tallo de las plantas a la altura de 20, 100, 130 y

200 cm medido desde el nivel del suelo, empleando cinta diamétrica. Las variables se denominaron **D20**, **D100**, **D130** y **D200**, según la altura, respectivamente.

En el caso de las plantas no podadas se midieron los diámetros en todos los ejes que presentaban las alturas mencionadas.

Sección (S): A partir de los múltiples diámetros se generaron dos variables correspondientes a la sección del fuste dependiendo si el mismo se correspondió a plantas podadas (único fuste) o no podadas (plantas con más de un fuste). Así, se denominó **S** a la sección que representa la suma cuadrática de los diámetros de todos los tallos en el caso de no podadas (como una aproximación para comparar las secciones entre podadas y no podadas), o la sección calculada a partir de su único fuste en el caso de las podadas. Por otro lado, en las plantas no podadas, se denominó **Se** (sección de fuste elegido) a la sección que corresponde sólo a la calculada a partir del diámetro del eje principal si éste hubiera sido podado con los mismos criterios empleados en la poda. Este eje principal, o elegido, se identificó al inicio del ensayo y se midió de manera periódica (figura 3). Se estimó la **S** según los **D** tomados a las distintas alturas, por lo que se crearon también para las plantas no podadas las variables **S20**, **S100**, **S130** y **S200**. Es posible que la comparación entre la **S** de las plantas podadas y no podadas no sea la manera más precisa, pero considerando la inexistencia de datos, esta comparación nos permite comprender el efecto de las prácticas en esta especie en cuanto a la cantidad de madera generada.

Figura 3. Imagen de plantas con poda indicando los diámetros para los cual se calcularon las secciones (S) y plantas sin podar indicando los diámetros en los múltiples ejes donde se calcularon las secciones (S) y el eje principal si este hubiera sido podado indicando la sección elegida (Se).



Altura: se midió la altura total (**Ht**) y de fuste (**Hf**) de cada planta empleando una vara telescópica graduada en centímetros. La Hf se define como la altura entre la base del fuste y la primer bifurcación del tallo principal.

Volumen de fuste (VF): se empleó la fórmula de Smalian (Prodan et al. 1997) que asimila el volumen de fuste al de un cilindro.

$$VF = \frac{(S_1+S_2)}{2} \times l \quad [1]$$

Así, se cubicaron los fustes en pie a partir de las distintas S. En el caso de las plantas *no podadas* se obtuvo el VF empleando la suma de las secciones de todos los tallos a las diferentes alturas, y el volumen del fuste elegido (**Vfe**) sólo empleando la sección del fuste elegido.

Volumen total (Vt): representa al VF más la suma del volumen restante de fuste respecto a la Ht, empleando la sección a 200 cm de altura, y la diferencia de la altura entre la Ht y los 200 cm de fuste.

Volumen de ramas (VR): Se empleó la fórmula del cono para estimar el volumen de cada rama podada.

$$V_R = \frac{S_r \times L_r}{3} [2]$$

Dónde: S_r = sección de la base de la rama

L_r = largo de la rama.

La sección de la rama se calculó a partir del diámetro de la rama medido a 3 cm de su inserción con calibre digital y el largo medido con regla graduada en cm.

Biomasa de ramas extraídas (psacc.): las ramas podadas en las dos fechas anuales de realizado el tratamiento (julio- enero) fueron pesadas en fresco con balanza digital. Una submuestra fue llevada a laboratorio para estimar su peso seco luego de ser secadas en una estufa a 60°C hasta alcanzar un peso seco estable.

Biomasa de hojas de ramas (BHR): A una muestra de ramas (n=16) les fueron separadas sus hojas para poder modelar el peso seco de hojas, estimado de manera similar al psacc., en función del peso seco de ramas, el modelo ajustado es el siguiente:

$$BHR = 8,912 + (0,3109 \times psacc) [3]$$

$$(R^2_{\text{ajust}}=0,90; N=16)$$

Biomasa total de hojas (BTH): Para estimar el valor de peso seco de hojas total de cada árbol se empleó un modelo que estima esta variable en función del diámetro basal de los árboles. Este modelo se realizó a partir de 24 árboles de plantaciones cercanas al ensayo con un diámetro promedio de 9,98 cm (en un rango de entre 2,5 a 17 cm), una

altura total media de 5,5 m (en un rango de entre 4 a 7,5 m), todos estos fueron apeados, separados en sus componentes y llevados a peso seco.

El modelo ajustado fue:

$$\log_{10}(BTH) = 2,06 + (0,9 \times \log_{10}(S20)) \quad [4]$$

$$(R^2_{\text{ajust}} = 0,71; N=24)$$

Donde $\log_{10} BTH$ = logaritmo de base 10 del peso seco de la hoja,

y $\log_{10}(S20)$ = logaritmo de base 10 de la sección del fuste a los 20 cm del suelo.

Área Foliar Específica (AFE): Se estimó a partir de la medición del área y el peso seco de tres hojas maduras tomadas de cada planta del ensayo. El procesamiento para la determinación del área de las hojas frescas se realizó por medio del programa ImageJ (Rasband 2007). El peso seco se obtuvo luego de llevar el material a una estufa a 60 °C durante 48 horas.

Área foliar total (AF): es el área foliar total a nivel de árbol y se obtuvo multiplicando BTH por AFE.

También se calculó el incremento relativo del AF a fin de comparar el efecto causado por los tratamientos en el desarrollo del dosel de los árboles durante este estudio, empleando para esto los valores medios de AF del año 2008 (AF_{inicial}) y 2012 (AF_{final}).

$$\text{Incremento AF} = \frac{(AF_{\text{final}} - AF_{\text{inicial}})}{AF_{\text{inicial}}} \quad [5]$$

Dónde: AF_{final} = área foliar al final de estudio y AF_{inicial} = área foliar al inicio de estudio. La ecuación 5 supone un incremento lineal del AF.

Área foliar extraída (AFex): el área foliar extraída por la poda de las ramas, estimada a partir del AFE multiplicado por BHR.

$$AF_{\text{ex}} = AFE \times BHR \quad [6]$$

Dónde: AFex= área foliar extraída, AFE= área foliar y BHR= biomasa de hoja de rama.

b- Variables a nivel de rodal: empleando las dimensiones de los árboles se calcularon medidas llevadas a unidad de superficie (hectárea). Las variables obtenidas son las siguientes:

Índice de área foliar (IAF): esta variable se calculó para el rodal, el índice de área foliar se calculó a partir de los datos de AF y densidad empleando la siguiente fórmula

$$IAF = AF \text{ (m}^2\text{)} \left(\frac{10.000 \text{ m}^2}{\text{Densidad}} \right)^{[7]}$$

Porcentaje de Radiación interceptada (PRI): este porcentaje será empleado como indicador del ambiente lumínico, mayor % de radiación interceptada indicarían un ambiente lumínico deficiente o sea menos luz. Para estimar PRI se empleó la fórmula de la Ley de Lambert-Beer (formula 11) la cual calcula la fracción de luz interceptada (FI) por el dosel de los árboles, multiplicada por 100, según:

$$FI = 1 - \left(\exp(-K \times IAF) \right) \text{ [8]}$$

Dónde:

FI= fracción de luz interceptada

K = coeficiente de extinción,

IAF= índice de área foliar.

Luego,

$$PRI = FI \times 100 \text{ [9]}$$

Se utilizó un valor de K de 0,5 basado en los valores expuesto en un meta análisis sobre el coeficiente de extinción (Zhang et al. 2014). En este artículo se presenta como valores promedio 0.56 0.16 (valor calculado a partir de 88 estudios) y para especies

arbustivas 0.560.13 (valor calculado a partir de 12 estudios).

Área basal (G): representa la suma de las secciones a 130 cm de altura (S130 y Se130) de todos los árboles en cada densidad de plantación.

Incrementos de crecimiento: se calculó para el DAP en centímetros y volumen de fuste en metros cúbicos para determinar posible detención del crecimiento bajo el efecto de los tratamientos aplicados. Se realizó un gráfico de los valores promedios para podadas y no podadas. Y una tabla que muestra por densidades su incremento en tamaño por año.

Incremento corriente anual (ICA): Expresa lo que el árbol creció en el último año de medición, por ejemplo se puede mencionar el incremento volumétrico anual, que sería la diferencia entre el volumen final y el volumen inicial en el último periodo.

$$ICA = Volumen_{año_{i+1}} - Volumen_{año_i} [10]$$

Incremento Medio Anual (IMA): Es un valor que expresa el promedio de crecimiento anual del árbol. Se calcula sobre la base del crecimiento total y la edad del árbol.

$$IMA = \frac{Volumen\ o\ Vble.\ a\ evaluar}{edad\ del\ árbol} [11]$$

Diámetro medio cuadrático (D_g): representa el diámetro equivalente al árbol de área basal media, estimado a partir del área basal y del número de pies (para el caso de las plantas podadas el pie es único mientras que para las no podadas se tiene en cuenta cada rama del árbol inserta por debajo de 1,3 metros de altura).

$$D_g = \frac{4 \times (G/N)}{\pi} [12]$$

Donde G = área basal y N = número de pies por ha.

Análisis de la Densidad: Estudiar la densidad y su vinculación con el desarrollo

del rodal futuro es posible mediante el análisis de las relaciones de tamaño-densidad. Estas relaciones son básicas para determinar los índices de densidad del rodal, los cuales son utilizados para caracterizar estados de desarrollo como los de crecimiento libre, crecimiento con competencia y mortalidad debido a la competencia (Penner et al. 2006). De estas relaciones se, se analizó la relación potencial entre el número de árboles y el diámetro promedio del rodal (Reineke 1933). Así, se modeló el logaritmo de la densidad en función del logaritmo del diámetro cuadrático (D_g), a fin de determinar los parámetros (ordenada al origen y pendiente) que permiten generar la recta que determina el máximo de densidad en función del tamaño de los árboles. De esta manera:

$$\text{Log}_{10}N = \alpha - (\beta \times \text{Log}_{10}D_g) \quad [13]$$

Dónde: $\text{Log}_{10}N$ = logaritmo base 10 de la densidad (árboles/ha);

$\text{Log}_{10}D_g$ = logaritmo base 10 del diámetro cuadrático medio,

α = intercepto

β = pendiente

La determinación de la línea máxima tamaño–densidad se realizó a través de análisis de regresión lineal simple mediante el método de los mínimos cuadrados ordinarios, utilizándose valores de las parcelas sin intervención (sin poda) y del período en el cual alcanzaron el máximo valor (2010), ya que es uno de los supuestos de Reineke. Como primer paso se obtuvo una línea de autorraleo considerada “promedio”, que representa todos los datos y permite la existencia de puntos sobre la línea. Luego, para obtener el límite máximo de la línea de autorraleo, se identificaron las tres unidades muestrales que presentan el máximo residual, obteniéndose así el valor promedio residual máximo (maxe_i), cifra que se suma al parámetro intercepto α , generando una línea paralela que representa la máxima relación tamaño densidad (Zhang 2005).

$$\text{MRTD} = \alpha + \max.e_i [14]$$

Dónde: MRTD= máxima relación tamaño densidad,

$\max.e_i$ = máximo residual,

α = parámetro interceptor.

Esta recta de máximo se empleó para analizar el grado de competencia tanto de las plantas podadas como no podadas, como así también la evolución en el tiempo del tamaño de los árboles comparando el tratamiento de poda.

3.5. Construcción del Diagrama de Manejo del Rodal (DMR)

Estructuralmente el DMR consiste en una serie de funciones, en este caso modelos lineales simples, que relacionan variables productivas y representan el efecto acumulativo de los procesos de competencia entre los árboles (Newton et al. 2005).

El DMR desarrollado en este estudio incluyó como curva de referencia la línea de autorraleo (AR), teniendo como ejes en las ordenadas el diámetro cuadrático, y en las abscisas la densidad de plantación. Dentro de este mismo plano se graficaron isolíneas del volumen de fuste por hectárea (m^3/ha) modeladas en función de D_g y densidad. De igual manera se modeló el PRI en función de D_g y densidad empleando un modelo lineal generalizado (MLG) con distribución binomial y función link tipo logit (Cabrero Ortega and García Pérez 2015). Para estos dos modelos se emplearon los datos de plantas podadas de los tres últimos períodos (2009, 2010 y 2012) el período 2008 no fue considerado dado que las plantas eran muy jóvenes y no expresaban diferencias en función de los tratamientos. En la discusión se empleará la curva de autorraleo, los datos medios de tamaño y densidad para combinarlos y extrapolar valores de volumen, IAF, EP y PRI antes mencionados.

Tanto el ajuste de los modelos, la comprobación de los supuestos y el gráfico de DMR se realizó empleando el programa R (Rodríguez n.d., R Core Team 2013). Las

unidades se presentan en valores normales pero graficados en escala logarítmica. Todos los modelos que intervienen en el DMR se presentan en la tabla 1.

Tabla 2. Modelos de tamaño-densidad, de isolíneas de volumen de fuste (VF_{ha}) e isolíneas de porcentaje de radiación interceptada (PRI).

Modelos		β_1	β_2	R^2_{ajust}
$Log_{10}N = \alpha + \beta_1 * Log_{10}Dg$	6,9737	-3,6164	—	0,9696
Error estándar	0,2212	0,2131	—	
$Log_{10}VF_{(ha)} = \alpha + \beta_1 * Log_{10}Dg + \beta_2 * Log_{10}N$	3.530	1.8318	0.9588	0,9855
Error estándar	0,0321	0,0140	0,0077	
$Logit(PRI) = \alpha + \beta_1 * Log_{10}Dg + \beta_2 * Log_{10}N$	-1.7824	0,3673	0,4892	*
Error estándar	0,1620	0,0707	0,0398	

*El Logit (PRI) fue modelado con LGM por lo cual no arroja valor de R^2 ajustado, sino AIC=8740,3. D_g = diámetro medio cuadrático (cm), N= densidad (plt./ha))

Esfuerzo de poda (EP): el esfuerzo de poda describe la relación entre el volumen de fuste logrado y el volumen que debería extraerse para obtener un único fuste.

En el caso de las plantas no podadas el volumen de fuste elegido es el que se obtendría si se hubiese podado, mientras que el obtenido (VF) es el volumen sin poda, por lo cual la relación:

$$EP_{no\ podadas} = \frac{(Vf - Vfe)}{Vfe} [15]$$

Esta describe qué proporción del fuste debería extraerse respecto al elegido. Por lo cual, a mayor valor de EP, menor es la calidad del fuste o, visto de otra manera, mayor es la cantidad de madera que debiera ser extraída para obtener un único fuste.

Para el caso de las plantas podadas el EP se estima con la siguiente relación:

$$EP_{podadas} = (VR/VF) [16]$$

Entre el VR extraído y el fuste logrado (VR/VF) por lo cual un mayor valor de EP significaría que se extrajeron más ramas para obtener el fuste logrado por lo cual la cantidad de nudos es mayor y la calidad es menor.

3.6. Análisis de los datos

Para comparar las variables entre tratamientos teniendo en cuenta la variabilidad dada en cada año se emplearon modelos lineales generalizados, para así poder detectar si el efecto proviene de los tratamientos o el ambiente.

Se construyeron distintos modelos a partir de combinaciones de variables fijas y aleatorias y se seleccionó el mejor modelo empleando el índice de Akaike. Así, se emplearon como efectos fijos la poda (poda y no poda) y la densidad (10 densidades) y sus interacciones, y como efecto aleatorio, se empleó la densidad anidada en el bloque, lo cual determina una parcela. Con este efecto (parcela), se buscó ajustar el efecto de micrositio.

De esta manera, la forma del modelo seleccionado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \lambda_k + b_k + p_{ki} + e_{kij}; i = 1, \dots, 10; j = 1, 2; k = 1, \dots, 4$$

Donde:

Y_{ijk} representa la respuesta observada en el i -ésimo nivel del factor densidad, j -ésimo nivel de factor *poda* y k -ésimo nivel de bloque,

μ representa la media general de la respuesta,

τ_i representa el efecto del i -ésimo nivel del factor *poda*,

γ_j representa el efecto del j -ésimo nivel del factor *densidad*,

λ_{ij} la interacción entre los factores *poda* y *densidad*,

b_k el k -ésimo nivel del factor *bloque* (factor aleatorio)

p_{kj} el efecto del *bloque* k en el nivel i de densidad (efecto aleatorio) (tómese esto como parcela),

e_{ijk} representa el error residual.

La correlación de los errores se modeló con la función autorregresiva de orden 1 o con la función de simetría compuesta. En cada caso se eligió la que aumentaba el valor de Akaike, mientras que la estructura de varianzas de los errores se modeló con la función de variancia de identidad o la de potencia, eligiendo entre éstas con el criterio anterior (Di Rienzo et al. 2011).

Como se mencionó, como factores aleatorios se consideró el bloque y de manera anidada, la densidad (densidad dentro de cada bloque): Esta combinación determina una parcela formada por sólo 3 árboles que pertenecen al mismo tratamiento de densidad y poda dentro de un mismo bloque. De esta manera, el modelo descartaría la variabilidad aportada por la parcela dada su posición, ya que en los ensayos Nelder las plantas más cercanas al norte sombrean a las plantas ubicadas más al sur. Se usó *LSD Fisher* como método de comparación entre los tratamientos y su interacción.

En el análisis de la producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y al ambiente lumínico, sólo se emplearon datos de plantas podadas. De las no podadas no se cuenta con datos de número, materia seca y volumen de sus ramas. En el 2012 no hubo rebrote de ramas en el fuste de las plantas podadas por lo cual no se analizó este período.

El crecimiento de los árboles se modeló en función de los tratamientos (densidad y poda) respecto a distintas variables (G, G elegida, VF, VF elegida).

4- Resultados

4.1. Caracterización de la intercepción de la radiación solar de plantaciones de *P. alba* en relación a la densidad y área foliar del rodal

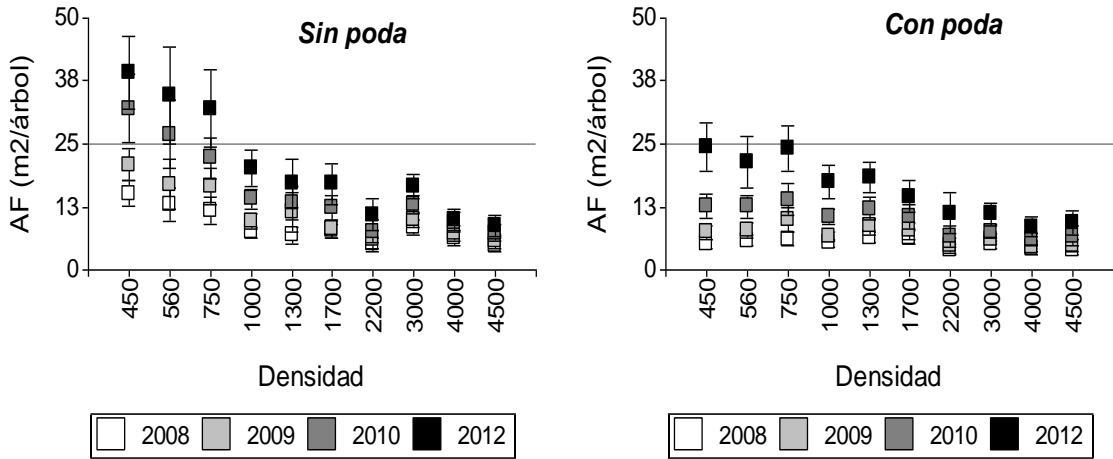
Tanto la poda como la densidad fueron factores significativos sobre el AF durante todo el estudio (exceptuando la poda en el año 2012 cuyo *P* fue de 0,0642; Tabla 3) dado que la poda de este último período fue casi nula debido a que casi no rebrotó el fuste luego del cuarto año, esto se presentará con más detalle más adelante del documento. La

Tabla 3. Valor de P del análisis de área foliar (AF) particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.” representa el factor densidad y “pda:dens”, la interacción.

Área foliar	2008	2009	2010	2012
(Intercept)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
pda	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0642
dens	0,036	0,005	0,0008	0,0019
pda:dens	0,0436	0,0868	0,0099	0,7283

diferencia en AF entre plantas podadas y no podadas se mantuvieron hasta el último año de medición (2012), en el cual las diferencias se diluyeron (Tabla 3). En general, se observaron los mayores valores de AF en plantas no podadas y creciendo a bajas densidades de plantación (gráfico 2). En particular para el último año de medición, el AF de las plantas sin podar creciendo a menores densidades fue significativamente mayor que el de las de alta densidad (alrededor de cuatro veces más AF, gráfico 2). En el caso de las plantas podadas, se observó el mismo patrón, entre plantas creciendo a baja y alta densidad siendo esta diferencia no mas de dos veces el AF (gráfico 2).

Gráfico 2. Área foliar (AF) promedio por árbol para cada densidad de plantación discriminado por año y práctica de poda. Línea marcando promedio máximo del AF alcanzado por plantas con poda (25 m²/árbol).



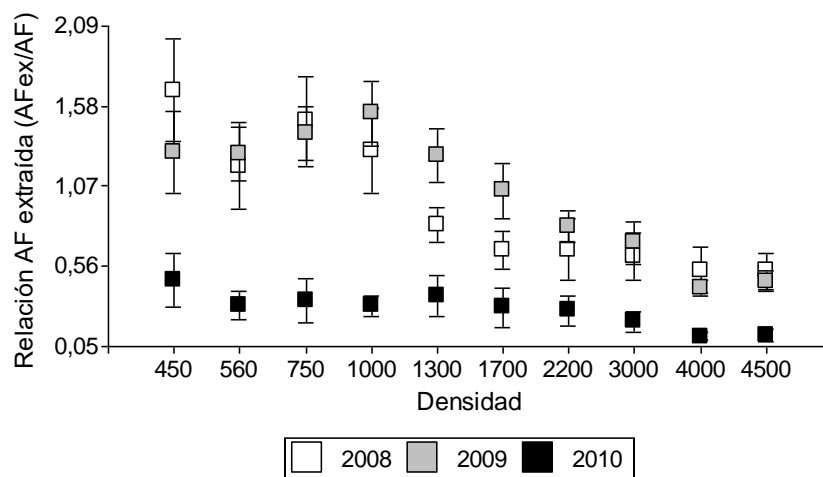
En cuanto al crecimiento del AF, se observa que los mayores valores se dieron en plantas con poda y que a menor densidad el incremento fue mayor. Para bajas densidades con poda, el AF aumentó entre 3 a 4 veces su tamaño respecto al inicial mientras que para plantas sin poda, sólo una vez y media en promedio (tabla 4).

Tabla 4. Incremento relativo del AF (Período 2008-2012)

Densidad	Sin poda	Con poda
450	157%	375%
560	169%	270%
750	175%	293%
1000	168%	225%
1300	148%	185%
1700	120%	128%
2200	116%	128%
3000	100%	183%
4000	59%	121%
4500	76%	109%

La relación entre la cantidad de AFex y el AF, relación que podría ser un indicador de la medida de eficiencia en crecimiento del área fotosintética, indica que la mayor tasa de extracción se observa en las menores densidades y en los primeros años. Para el 2010 los valores se equiparan en todas las densidades (Gráfico 3).

Gráfico 3. Eficiencia del crecimiento del área foliar en función de la densidad.



En el análisis estadístico del IAF, si bien el efecto de la poda y la densidad fue significativo en casi todos los años de manera similar al estudio del AF, no se encontraron diferencias significativas en ninguna interacción para todos los años medidos (Tabla 5). La falta de interacción entre poda y densidad puede explicarse dado que el efecto de las densidades probadas no modifican el efecto de la poda en ningún caso, esto no descarta que en otras circunstancias una menor o mayor cantidad de árboles modifique el efecto de la práctica de poda.

De manera contraria al AF, los mayores valores de IAF se observaron en las parcelas con plantas creciendo en alta densidad (gráfico 4, Tabla 6). Los mayores valores se observaron en las parcelas con plantas no podadas ($IAF=4,99 \pm 2,47$) creciendo a alta densidad (3000 plt/ha). Las plantas podadas creciendo en alta densidad mostraron valores de alrededor de 4 (Tabla 6).

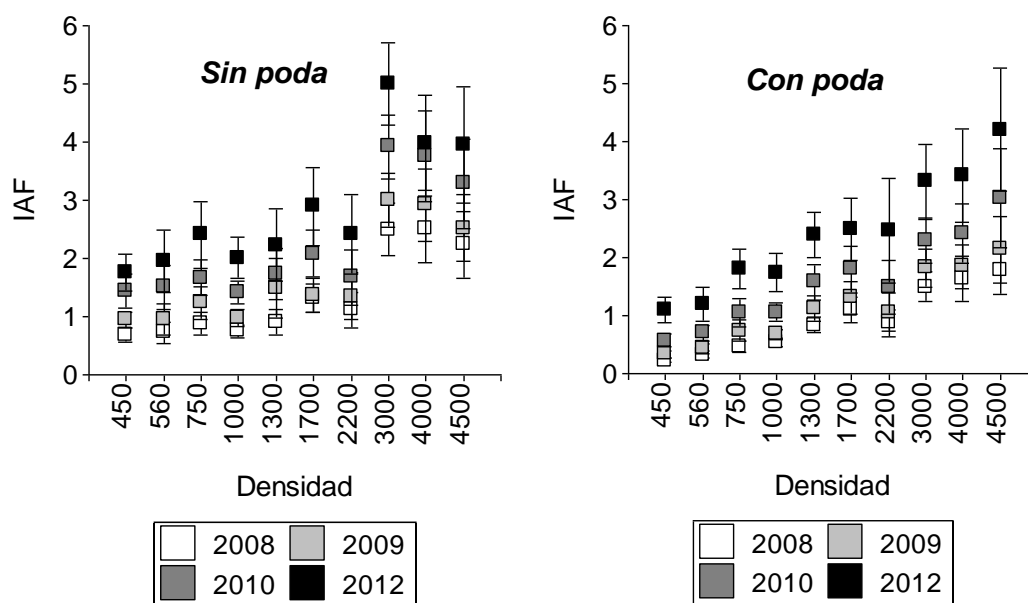
Tabla 5. Valor de P del análisis de índice de área foliar (IAF) particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.” representa el factor densidad y “pda:dens” la interacción entre ambos factores.

Índice de área foliar	2008	2009	2010	2012
Intercepto	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
pda	0,0007	0,0004	0,0011	0,0617
dens	0,0001	0,0006	0,0015	0,0035
pda:dens	0,9281	0,8748	0,7124	0,8612

Tabla 6. Medias y desvío estándar del Índice de área foliar (IAF) de los distintos tratamientos (densidad de plantación y poda) estimado para el último año del ensayo (2012). Se destacan los valores máximos de IAF para cada tratamiento de poda.

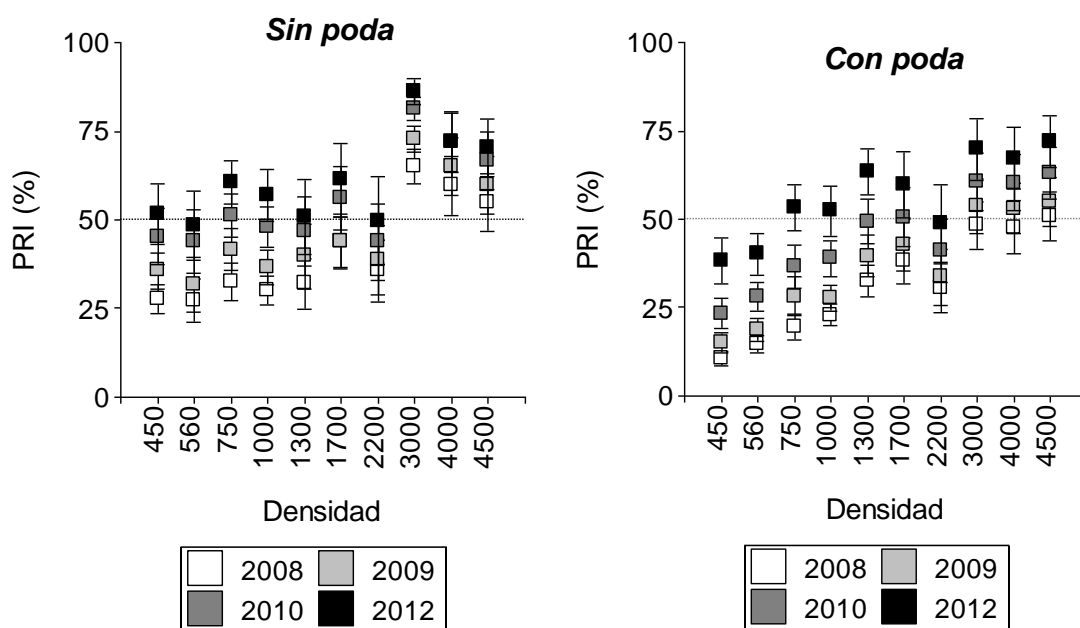
Densidad	Sin poda		Con poda	
	IAF Media	D.E.	IAF Media	D.E.
450	1,76	1,13	1,1	0,76
560	1,94	1,86	1,2	0,98
750	2,41	1,98	1,8	1,19
1000	2,01	1,25	1,74	1,11
1300	2,23	2,17	2,39	1,35
1700	2,9	2,33	2,48	1,87
2200	2,41	2,38	2,46	3,11
3000	4,99	2,47	3,31	2,22
4000	3,99	2,86	3,41	2,79
4500	3,94	3,47	4,2	3,69

Gráfico 4. Índice de área foliar (IAF) promedio para cada densidad de plantación discriminado por año y práctica de poda.



La capacidad de interceptar la radiación solar (PRI) fue mayor en los tratamientos de mayor densidad de plantación, mientras que la poda produjo un efecto negativo (gráfico 5). De manera lógica, los mayores valores de PRI se estimaron en el último año de medición. Así, un rodal de 3000 plt/ha sin poda intercepta a los 7 años de edad hasta un $86,31 \pm 12,68\%$ de radiación solar, mientras que para plantas podadas el mayor valor alcanzado es de $71,98 \pm 25,95\%$, o sea un 15 a 20% menos de intercepción es debido a la poda. Debe destacarse que en ambos casos las densidades mayores (3000, 4000 y 4500 plt/ha) desde temprana edad interceptan más del 50% de la radiación solar incidente. De manera contraria, las menores densidades con poda no superaron el 50% de intercepción de luz (450 y 560 plt/ha). En el caso de las parcelas con plantas no podadas, todas las densidades superaron ese umbral en el último año pero para las dos densidades menores los valores no superaron el 60% de intercepción.

Gráfico 5. Porcentaje de luz interceptada (PRI) en función de la densidad y el grado de poda, para cada año de medición. La línea (- - -) denota el % 50 de interceptación de la luz.



4.2. Producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y al ambiente lumínico

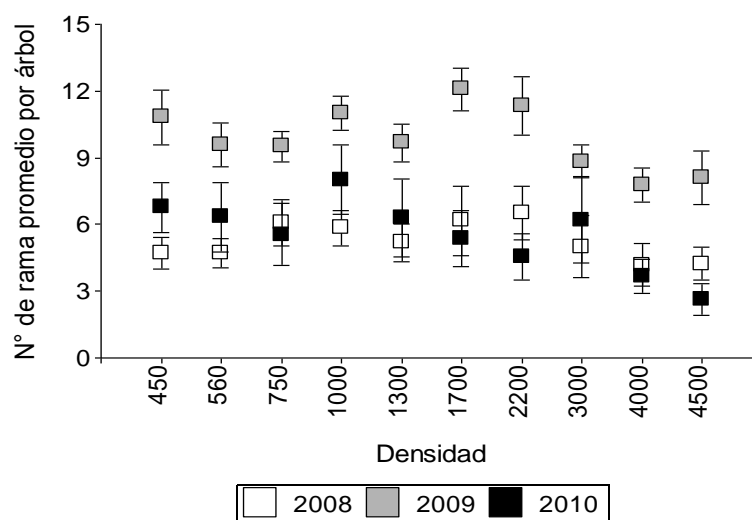
Se observaron diferencias significativas en el número de ramas (NR) por individuo en el año 2009 y 2010 en función de las densidades (Tabla 7), sin embargo, estas diferencias no siguen ningún patrón por lo cual no podría indicarse que sea la densidad el causante de este efecto (Gráfico 6). El NR podadas por individuo varió desde 2,6 hasta 12, observándose que en el 2009 se extrajo el mayor NR en todas las densidades ($12,8 \pm 3,32$). En el 2008 el promedio de ramas extraídas por poda fue regular, en donde se extrajeron en promedio entre $4,18 \pm 3$ y $6,5 \pm 3,8$ ramas/árbol. En este año no se observaron diferencias entre tratamientos ($P=0,5284$, tabla 7). En el 2010, el NR disminuyó respecto al 2009, pero coincidente con la tendencia general, en las mayores

densidades el NR que se extrajo fue menor que en árboles plantados a menor densidad (Tabla 7, gráfico 6).

Tabla 7. Valor de P del análisis del número de ramas podadas en función de densidad, particionado por año.

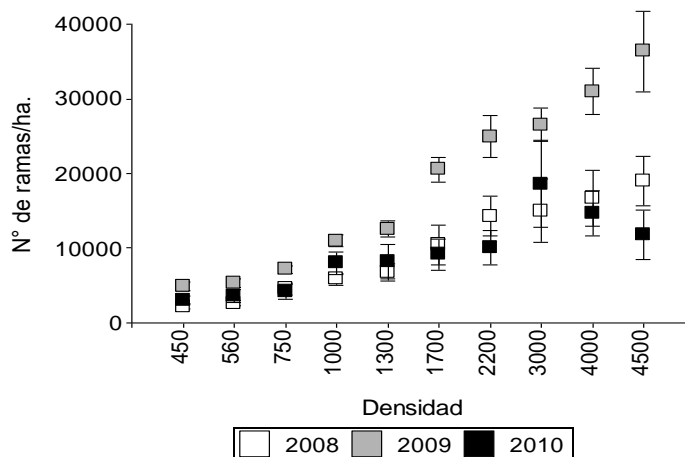
N° de ramas	2008	2009	2010
(Intercept)	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Densidad	0,5284	0,0397	<0,0001

Gráfico 6. Número de ramas podadas promedio por árbol en función de la densidad para cada



El análisis del NR por hectárea indicó que se alcanzaron valores de hasta 4 veces más en las mayores densidades respecto a las menores (gráfico 7). También se observa

Gráfico 7. Número de ramas promedio por hectárea en función de la densidad de plantación para cada año.



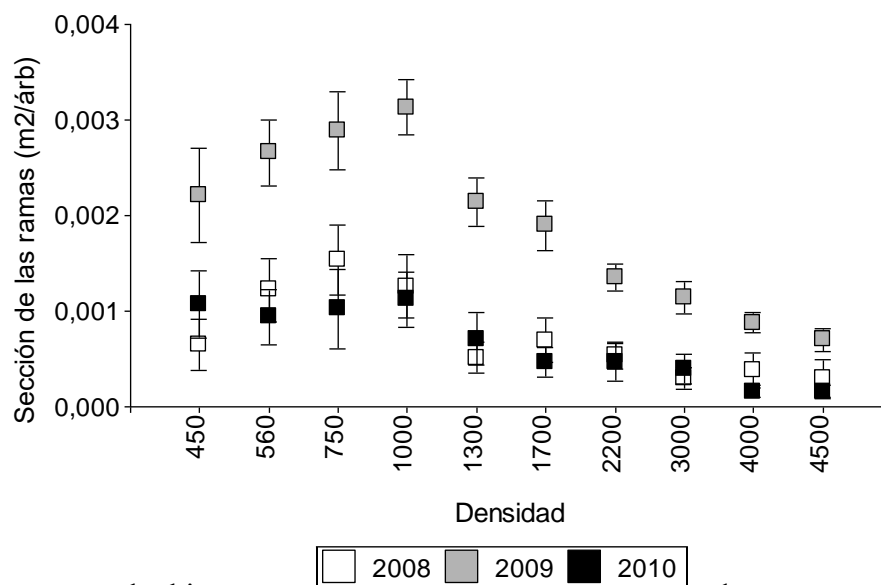
que el NR por hectárea varió según el año, siendo mayor su valor en el año 2009 que en los otros dos años de medición.

Se observó que el efecto de la densidad de plantación fue significativo sobre la sección de las ramas podadas (**S**) en los primeros años de medición (Tabla 8). En el año 2009 se extrajeron ramas de mayor tamaño que en los otros años, en donde las ramas podadas en los árboles creciendo a menor densidad (450 a 1000 plt/ha.) Mostraron una mayor sección que la de los árboles en las mayores densidades (gráfico 8). La rama promedio de mayor tamaño se observó en el 2009 en individuos creciendo a 1000 plt/ha ($0,0031\text{m}^2 \pm 0,0010$; gráfico 8). En el 2010, la diferencia entre el tamaño de las ramas podadas entre densidades disminuye, no superando el valor P el nivel de significancia.

Tabla 8. Valor de P del análisis de la sección de ramas por árbol en función de la densidad de plantación, particionado por año.

Sección de ramas	2008	2009	2010
(Intercept)	<0,0001	<0,0001	0,0403
Densidad	<0,0001	0,0303	0,1149

Gráfico 8. Sección media de las ramas por árbol en función de la densidad para cada año de medición.



En cuanto la biomasa de ramas podadas, el resultado es coincidente con el anterior ya que los árboles creciendo a la menor densidad producen una mayor biomasa acumulada promedio de ramas podadas (Tabla 9). También se observa que la mayor biomasa de ramas podadas se obtuvo durante el año 2009, alcanzando el máximo promedio de 5,05 kg en árboles creciendo a 750 plt/ha. La mínima biomasa se observó en el año 2010 en donde se midió 0,14 kg en árboles creciendo a 4500 plt/ha (Tabla 9, gráfico 9).

Tabla 9. Medias y desvío estándar del peso seco acumulado de ramas ($Psacc=kg/planta$) por árbol, discriminado por densidad de plantación y año.

Densidad	2008		2009		2010	
	Psacc	D.E.	Psacc	D.E.	Psacc	D.E.
450	2,9	1,75	3,48	3,28	1,52	1,52
560	3,31	3,19	4,33	2,49	1,25	1,08
750	3,26	2,23	5,05	3,46	1,35	1,56
1000	3,15	2,22	4,83	2,14	1,3	0,89
1300	1,71	1,14	3,29	1,82	0,78	1,04
1700	1,3	0,87	2,75	1,76	0,54	0,42
2200	1,46	1,26	1,55	0,79	0,5	0,6
3000	1,2	1,05	1,22	0,84	0,32	0,44

4000	0,8	0,62	0,73	0,36	0,22	0,15
4500	0,69	0,81	0,46	0,36	0,14	0,17

La cantidad de biomasa total extraída disminuye en la medida que los árboles crecen (gráfico 10). En los primeros dos años se extrajo una biomasa de alrededor de 2500 kg/ha, mientras que en el último año, este valor fue de menos de 1000 kg/ha. Las máximas cantidades acumuladas de biomasa se alcanzaron en las densidades intermedias, llegando a un máximo absoluto en la densidad de 1000 plt/ha en donde estuvo cercano a los 10.000 kg de ramas extraídas en todo el periodo de ensayo.

Gráfico 9. Peso seco promedio de ramas extraídas por árbol para cada densidad por año

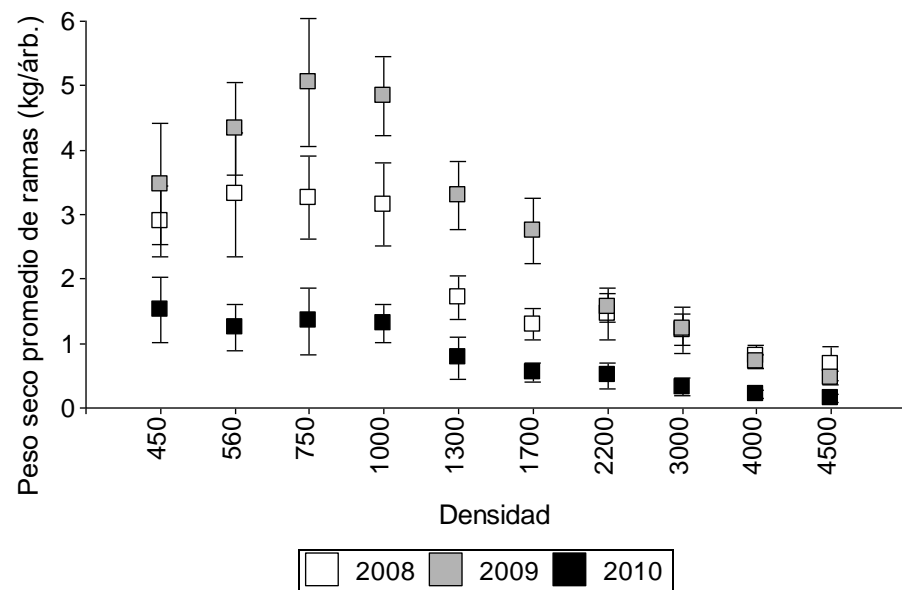
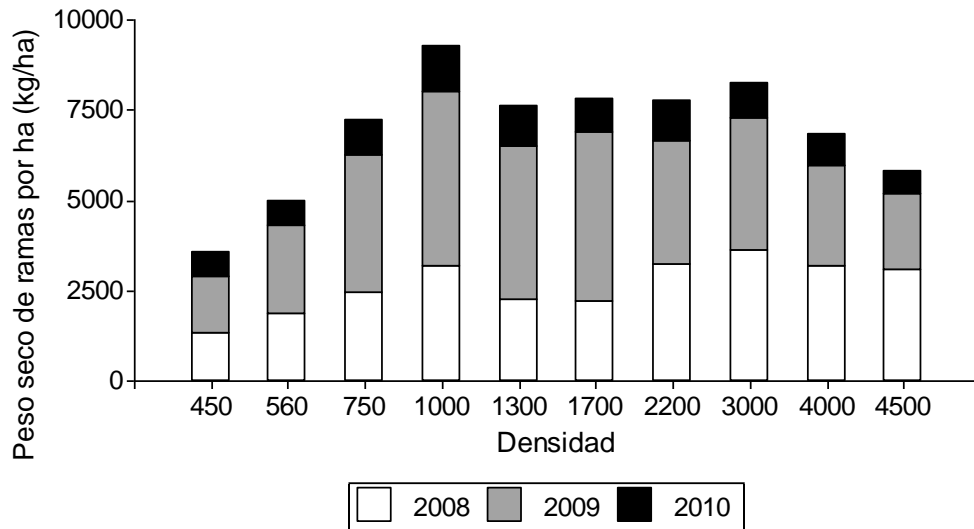
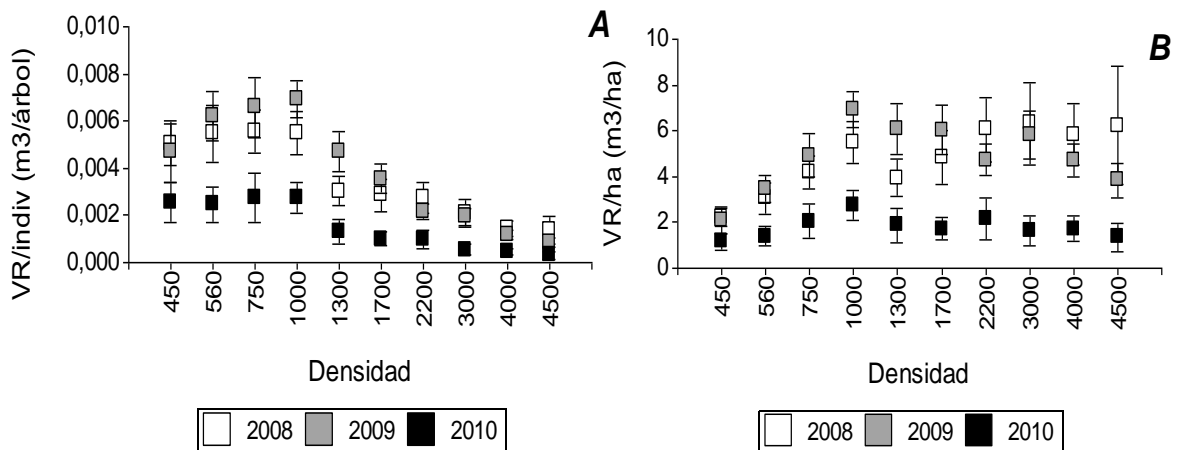


Gráfico 10. Peso acumulado de ramas extraídas por hectárea para cada densidad y año.



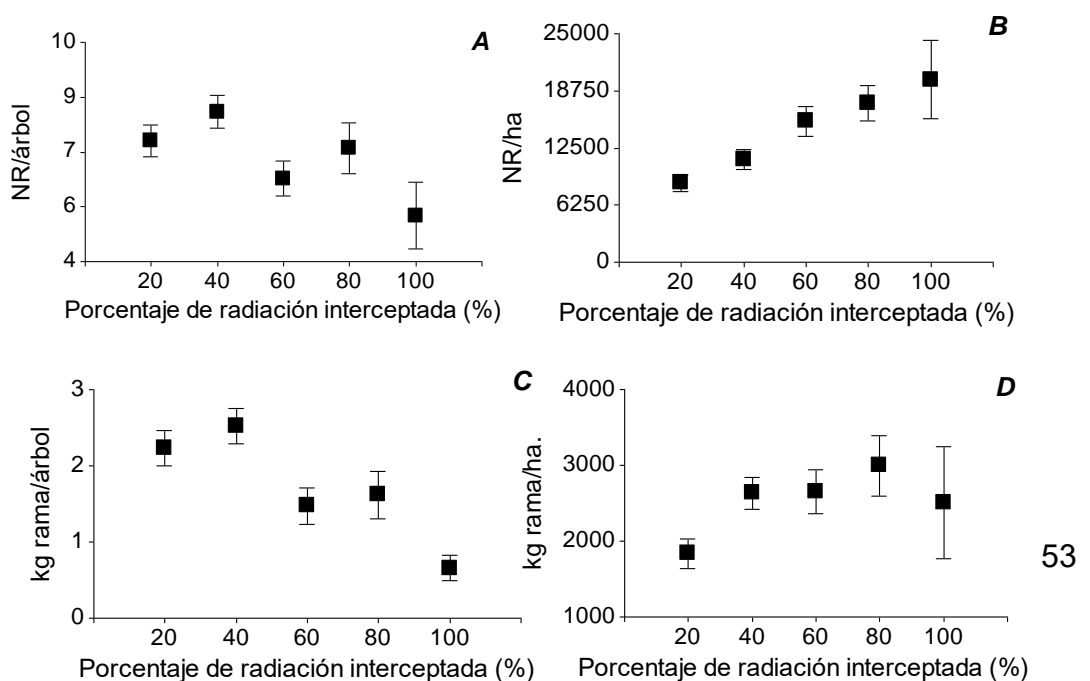
El volumen de ramas extraídas siguió un patrón similar al NR (gráfico 11). En los árboles de las menores densidades de plantación, el volumen promedio de ramas extraídas fue mayor que en las de mayores densidades (Gráfico 11 A), aunque al calcular el volumen dado por hectárea solo existen diferencias en las densidades menores respecto al resto (gráfico 11 B).

Gráfico 11. Volumen de ramas (VR) promedio por individuo en función de la densidad por año (A) y volumen de rama promedio por hectárea por densidad y por año (B).



Se relacionó (sin particionar por densidad ni año) el NR por árbol con el PRI observando que a mayor radiación interceptada disminuye moderadamente el número promedio de ramas por árbol (gráfico 12 A). Un patrón contrario se observa al analizar el NR por hectárea, en donde dicha variable aumenta con el aumento del PRI (gráfico 12 B). El peso seco promedio de ramas podadas por árbol disminuye a partir del 50% de la radiación interceptada (gráfico 12 C). Esto indicaría que, si bien el tamaño individual de las ramas disminuye, esto es compensado por un mayor número de ramas lo que explicaría la mayor intercepción de luz. El peso seco por hectárea aumenta notablemente hasta el 50% de intercepción, a partir del cual es posible observar una disminución del peso de ramas (gráfico 12 D).

Gráfico 12. A- Número de ramas promedio por árbol en función del porcentaje de radiación interceptada (PRI), B- Número de ramas promedio por ha. En función del PRI, C- Peso seco promedio acumulado por árbol en función del PRI y D- Peso seco acumulado por ha. Promedio en función del PRI.



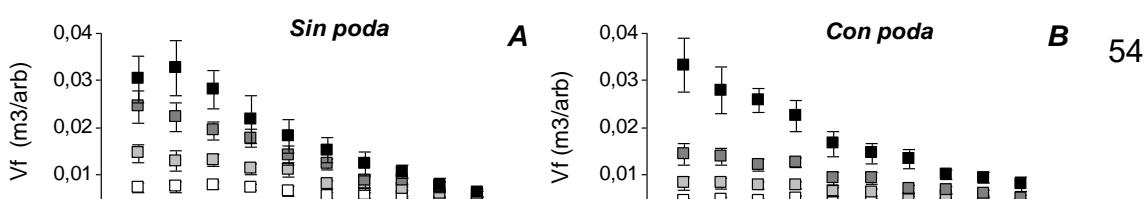
4.3. Análisis del efecto interactivo de intensidad de poda y densidad de individuos en la calidad y volumen de fuste maderable

El volumen de fuste (VF) a nivel de árbol fue sensible a los tratamientos de poda (excepto en el último año de medición) y distanciamiento, como así también a su interacción (exceptuando también el mencionado año, Tabla 10). En cuanto a los valores de VF por hectárea, la interacción no fue significativa en ninguno de los años de medición, y el factor poda no tuvo un efecto estadísticamente significativo en el último año de medición (Tabla 10).

Tabla 10. Valor de P del análisis del volumen de fuste (VF) por árbol y por hectárea en función de densidad, poda y su interacción particionado por año. “Pda.” representa el factor poda, “dens.” representa el factor densidad y “pda:dens” la interacción entre ambos factores.

VF/árbol					VF /ha				
AÑO	2008	2009	2010	2012	AÑO	2008	2009	2010	2012
intercepto	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	Intercepto	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Pda	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,53	Pda	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,2391
Dens	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	dens	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001
pda:dens	0,0082	0,0001	0,0001	0,9695	pda:dens	0,6955	0,7983	0,9934	0,9354

Gráfico 13. A- Volumen de fuste promedio por árbol sin poda en función de la densidad. B- Volumen de fuste promedio por árbol con poda en función de la densidad. C- Volumen de fuste promedio por ha sin poda en función de la densidad. D- Volumen de fuste promedio por ha. con poda en función de la densidad.



Los árboles con poda de las menores densidades de plantación presentaron los mayores valores de VF en el año 2012 ($0,0332 \pm 0,0187 \text{ m}^3/\text{árbol}$) (gráfico 13 B). El mayor valor de VF por hectárea se dio en el tratamiento de plantas podadas con una densidad de 4000 plt/ha ($37,14 \pm 16,69 \text{ m}^3/\text{ha}$, ver gráfico 13 D). Si bien existen diferencias significativas del VF a nivel de árbol individual, los valores medios en el 2008 no muestran mucha variabilidad entre tratamientos. Desde el 2009 comienzan a diferenciarse más claramente los VF entre densidades, en donde se observa una relación negativa con la densidad de plantación. Al llevar este valor a hectárea, el VF es mayor en las mayores densidades de plantación, dada la gran diferencia entre densidades que multiplican el volumen individual. Se observa una disminución del VF a partir del año 2009 en la parcela con la mayor densidad de plantación, con una mayor disminución en las parcelas sin poda, posiblemente debido a la alta competencia intraespecífica (gráfico 13 C y D).

La sección elegida de los árboles (Se130) fue afectada por los tratamientos a partir

del año 2009. Así, en el primer año no se observó efecto de los tratamientos ni de la interacción, y para el último año de medición el efecto también se diluyó, mostrando diferencias significativas entre densidades de plantación (tabla 11). El máximo valor promedio se observó en plantas podadas plantadas a 450 plt/ha ($0,0175 \pm 0,01 \text{ m}^2/\text{árbol}$) (Gráfico 14 B). En el año 2012, en plantas sin poda la Se130 disminuyó incluso por debajo del valor de las de 2010 (gráfico 14 A). Este comportamiento se explica por la muerte de plantas o ramas que formaban parte del cálculo de la sección en esas densidades.

En cuanto a valores de área basal (G), las magnitudes extrapoladas a hectárea diluyen las diferencias no siendo significativa la interacción de la poda y la densidad en ningún año. El máximo valor registrado al finalizar el ensayo se observó en plantas podadas creciendo a densidades de 4000 plt/ha ($19,16 \pm 8,51 \text{ m}^2/\text{ha}$). Si bien las plantas sin poda a esa misma densidad alcanzaron un mayor valor ($23,3 \pm 12,59 \text{ m}^2/\text{ha}$), éste fue observado en el año 2010 y luego de esto disminuyó a $15,46 \pm 11,63 \text{ m}^2/\text{ha}$.

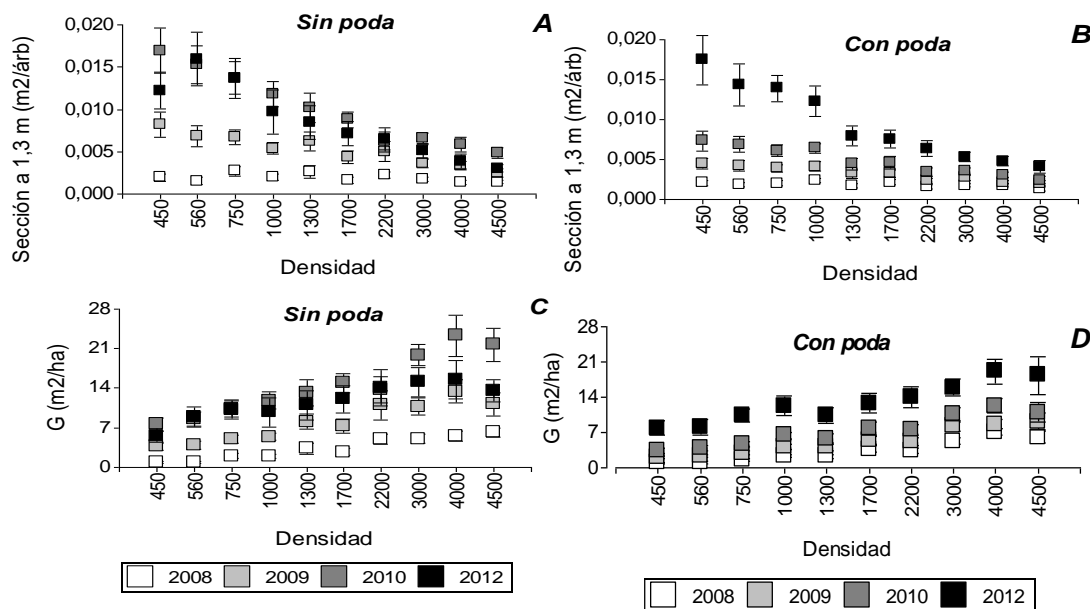
Tabla 11. Valor de P del análisis de la sección normal a 1,3 m de altura de fuste (Se130) por árbol y por hectárea (área basal, AB) en función de densidad, poda y su interacción particionada por año.

Se130/árbol				
AÑO	2008	2009	2010	2012
Intercepto	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Pda	0,0245	<0,0001	<0,0001	0,297
Dens	0,224	<0,0001	<0,0001	<0,0001
pda:dens	0,2976	0,0013	0,0001	0,728
AB				
AÑO	2008	2009	2010	2012
Intercepto	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Pda	0,3393	<0,0001	<0,0001	0,0535

dens	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
pda:dens	0,4145	0,3403	0,2531	0,9450

Los valores de área basal (G) de plantas sin podar del año 2010 son mayores que los del 2012 debido a una disminución en el número total de plantas (gráfico 14 C). En cuanto a las plantas con poda (gráfico 14 D), si bien el G es menor que el observado en los rodales con plantas sin podar, en general, la mortalidad de individuos es ínfima, lo que no afectó el G como en el tratamiento de plantas sin poda. También se destaca la distancia entre los valores del 2010 y el 2012 para las plantas podadas, siendo mayor a partir de 1000 plt./ha o menos.

Gráfico 14. Sección normal y área basal de los distintos tratamientos. A – Sección normal en función de las densidades por año en plantas sin poda, B - Sección normal en función de las densidades por año en plantas podadas. C - Área basal en función de las densidades por año, plantas sin poda. D – Área basal en función de las densidades por año, plantas con poda



En términos generales, el crecimiento de plantas podadas no disminuyó en ningún

período (salvo el incremento medio para 4000 plt./ha en el año 2009), mientras que en las plantas no podadas el incremento anual y medio decayó en el último período (Tabla 12). Debe destacarse que las menores densidades sin poda alcanzaron crecimientos promedios de entre 1,9 a 2,1 cm por año calculado en el diámetro de todos los ejes mientras que las plantas con poda crecieron en el último período de 1,6 a 1,8 cm en un solo eje con un incremento corriente anual de hasta 3,6 cm de DAP en el 2010.

Tabla 12. Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del diámetro a la altura del pecho (DAP, cm.) para cada densidad, en plantas con y sin poda. Las flechas indican si el cambio fue en aumento (verde), disminución (roja) o permaneció constante (amarillo)

		PERÍODOS							
	Densidad	ICA '08-'09	ICA '09-'10	ICA '10-'12	IMA '08	IMA '09	IMA '10	IMA '12	
Sin poda	450	2,8 ↑	3,3 ↑	2,5 ↓	0,9	1,6 ↑	2,1 ↑	1,5 ↓	
	560	2,6 ↑	3,3 ↑	0,9 ↑	0,8	1,5 ↑	2,0 ↑	1,7 ↓	
	750	2,3 ↑	3,0 ↑	0,2 ↓	1,1	1,5 ↑	1,9 ↑	1,6 ↓	
	1000	2,1 ↑	2,9 ↑	1,6 ↓	0,9	1,3 ↑	1,7 ↑	1,3 ↓	
	1300	2,2 ↑	2,2 ↑	1,5 ↓	1,1	1,4 ↑	1,6 ↑	1,2 ↓	
	1700	1,9 ↑	2,4 ↑	1,5 ↓	0,8	1,2 ↑	1,5 ↑	1,1 ↓	
	2200	1,9 ↑	1,3 ↑	0,5 ↑	1,0	1,3 ↑	1,3 ↓	1,1 ↓	
	3000	1,6 ↑	2,0 ↑	1,4 ↓	0,8	1,1 ↑	1,3 ↑	1,0 ↓	
	4000	1,6 ↑	1,8 ↑	1,6 ↓	0,8	1,0 ↑	1,2 ↑	0,8 ↓	
	4500	1,2 ↑	1,7 ↑	1,5 ↓	0,8	0,9 ↑	1,1 ↑	0,7 ↓	
Con poda	450	1,8 ↑	1,9 ↑	3,6 ↑	0,9	1,2 ↑	1,4 ↑	1,8 ↑	
	560	1,7 ↑	1,9 ↑	3,1 ↑	0,9	1,2 ↑	1,3 ↑	1,6 ↑	
	750	1,6 ↑	1,7 ↑	3,1 ↑	0,9	1,1 ↑	1,2 ↑	1,6 ↑	
	1000	1,5 ↑	1,7 ↑	2,7 ↑	1,0	1,1 ↑	1,3 ↑	1,5 ↑	
	1300	1,4 ↑	1,2 ↑	2,1 ↑	0,8	1,0 ↑	1,1 ↑	1,2 ↑	
	1700	1,2 ↑	1,3 ↑	1,9 ↑	1,0	1,0 ↑	1,1 ↑	1,2 ↑	
	2200	1,0 ↑	1,2 ↑	1,9 ↑	0,8	0,9 ↑	0,9 ↑	1,1 ↑	
	3000	1,1 ↑	1,0 ↑	1,5 ↑	0,9	0,9 ↑	1,0 ↑	1,0 ↑	
	4000	0,6 ↑	1,1 ↑	1,5 ↑	0,9	0,8 ↓	0,9 ↑	0,9 ↑	
	4500	0,9 ↑	0,7 ↑	1,4 ↑	0,8	0,8 ↑	0,8 →	0,9 ↑	

En cuanto al incremento del VF (ICA e IMA de VF), las plantas sin poda mostraron una pérdida de la tasa de crecimiento en el penúltimo y último período, mientras que en las podadas, dicho fenómeno se observó en los tratamientos con 3000 y

4000 plt/ha (tabla 13). Los mayores valores alcanzados en plantas sin poda se observaron en las menores densidades (5,88 m³/ha/año promedio), siendo relativamente mayor a los 5 m³/ha/año estimado para las parcelas podadas. En las menores densidades estos valores no superan los 2 m³/ha/año en todas las situaciones.

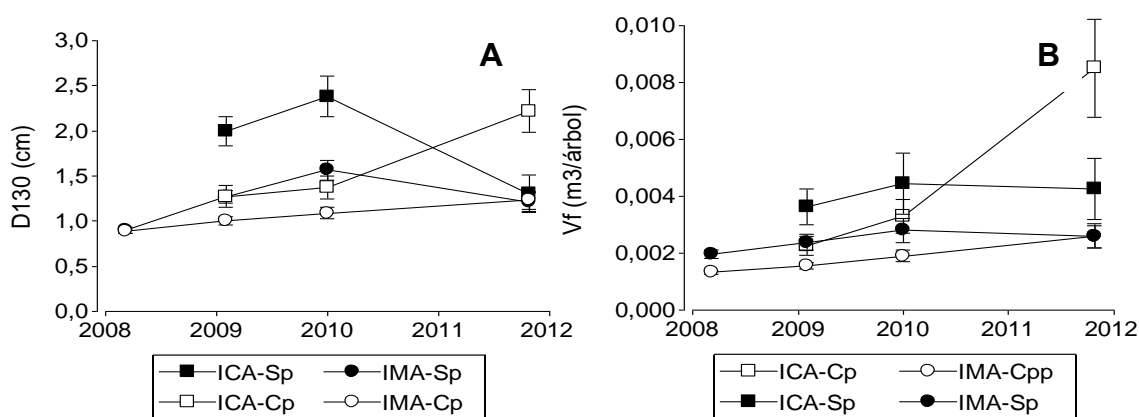
Tabla 13. Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del volumen de fuste (VF, m³.) para cada densidad, en plantas con y sin poda. Las flechas indican si el cambio

	Densidad	PERÍODO									
		ICA '08-'09	ICA '09-'10	ICA '10-'12	IMA '08	IMA '09	IMA '10	IMA '12			
Sin poda	450	0,00723 ↑	0,00999 ↑	0,00587 ↓	0,0024	0,00361 ↑	0,00489 ↑	0,0043 ↓			
	560	0,00557 ↑	0,00927 ↑	0,01059 ↑	0,0024	0,00322 ↑	0,00443 ↑	0,0047 ↑			
	750	0,00548 ↑	0,00616 ↑	0,00884 ↑	0,0025	0,00328 ↑	0,00385 ↑	0,004 ↑			
	1000	0,0039 ↑	0,00657 ↑	0,0041 ↓	0,0024	0,00277 ↑	0,00353 ↑	0,0031 ↓			
	1300	0,00448 ↑	0,00324 ↓	0,00396 ↑	0,0021	0,00272 ↑	0,00282 ↑	0,0026 ↓			
	1700	0,00239 ↑	0,00434 ↑	0,00292 ↓	0,0018	0,00196 ↑	0,00244 ↑	0,0022 ↓			
	2200	0,00235 ↑	0,00069 ↓	0,00359 ↑	0,0019	0,00198 ↑	0,00172 ↓	0,0017 ↑			
	3000	0,00201 ↑	0,00159 ↓	0,00198 ↑	0,0017	0,00175 ↑	0,00172 ↓	0,0015 ↓			
	4000	0,00193 ↑	0,0014 ↓	0,00029 ↓	0,0013	0,00147 ↑	0,00146 ↓	0,0011 ↓			
	4500	0,00091 ↑	0,00128 ↑	0,00037 ↓	0,0012	0,00111 ↓	0,00114 ↑	0,0009 ↓			
Con poda	450	0,00381 ↑	0,0062 ↑	0,01895 ↑	0,0014	0,00202 ↑	0,00286 ↑	0,0047 ↑			
	560	0,00356 ↑	0,00574 ↑	0,01402 ↑	0,0015	0,00201 ↑	0,00276 ↑	0,004 ↑			
	750	0,00336 ↑	0,00442 ↑	0,01365 ↑	0,0014	0,0019 ↑	0,00241 ↑	0,0037 ↑			
	1000	0,00282 ↑	0,00489 ↑	0,00994 ↑	0,0016	0,00192 ↑	0,00251 ↑	0,0032 ↑			
	1300	0,00238 ↑	0,00279 ↑	0,00737 ↑	0,0013	0,00157 ↑	0,00181 ↑	0,0023 ↑			
	1700	0,00181 ↑	0,00301 ↑	0,00519 ↑	0,0015	0,00155 ↑	0,00184 ↑	0,0021 ↑			
	2200	0,00135 ↑	0,00203 ↑	0,00639 ↑	0,0011	0,0012 ↑	0,00136 ↑	0,0019 ↑			
	3000	0,00152 ↑	0,00147 ↓	0,00325 ↑	0,0012	0,00131 ↑	0,00134 ↑	0,0014 ↑			
	4000	0,00101 ↑	0,00135 ↑	0,00331 ↑	0,0012	0,00116 ↓	0,0012 ↑	0,0013 ↑			
	4500	0,00099 ↑	0,00115 ↑	0,00302 ↑	0,0009	0,00092 ↑	0,00096 ↑	0,0011 ↑			

El análisis de la trayectoria del ICA e IMA en el tiempo indica que, cuando ambas se cruzan, el crecimiento disminuye. En este sentido, se observa el cruzamiento del ICA y el IMA solamente en las plantas sin poda, lo que indica la importancia de la intervención (gráficos 15 A y B). A la vez, estos gráficos representan el promedio para todas las densidades, dado que un gráfico en donde se muestren todas las densidades juntas sería poco claro. El volumen de fuste (VF), si bien no muestra el cruzamiento de las dos

variables, sí presenta una pérdida de pendiente del ICA y el IMA para las plantas no podadas, mientras que para las podadas no ocurre esto (gráfico 15 B).

Gráfico 15.A- Incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) del diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles con y sin poda (Cp. y Spa, respectivamente). B- ICA e IMA del volumen de fuste de árboles con y sin poda



El esfuerzo de poda (EP) disminuyó con el tiempo dado el menor número de rebrote de ramas en el caso de las plantas podadas (gráfico 16). En el caso de las plantas sin poda, esta disminución se debió al menor crecimiento de las ramas que debieran ser podadas si se quisiese obtener un fuste único.

En particular para las plantas sin poda, en los años 2008 y 2009, no se observó una influencia de la densidad en el EP (Tabla 14). Sin embargo, con el correr del tiempo, la densidad afectó el crecimiento de las ramas por lo que se estimó un menor EP en las mayores densidades.

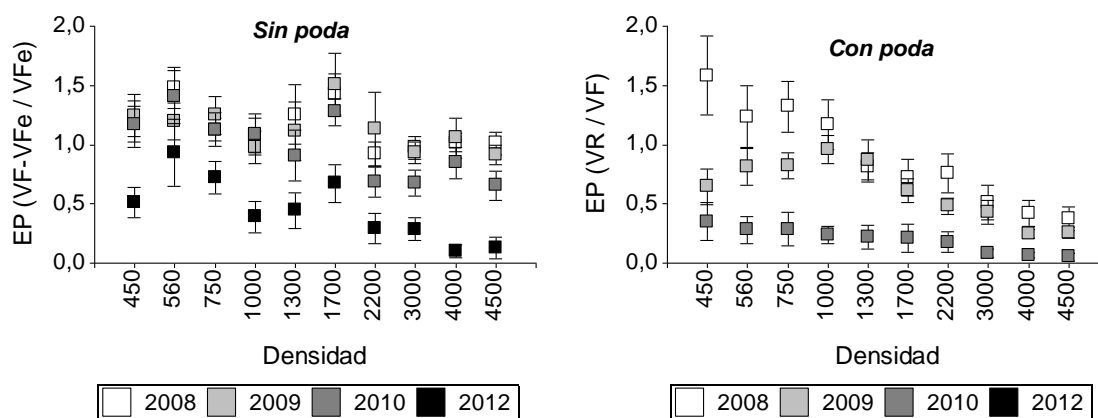
En las parcelas con árboles podados, se observó que la densidad afectó el EP. Sin

embargo, en el año 2009, las menores densidades mostraron una caída del valor de EP, no mostrando diferencias significativas a partir del año 2010 (Tabla 14).

Tabla 14. Valor de P del análisis del Esfuerzo de Poda para plantas con y sin poda por árbol en función de la densidad de plantación y el año.

Esfuerzo de poda (Sin poda)					Esfuerzo de poda (Con poda)				
Intercepto	2008	2009	2010	2012	Intercepto	2008	2009	2010	2012
		<0,0001	<0,0001	<0,0001		<0,0001		<0,0001	<0,0001
Densidad	0,0748	0,5791	0,0249	0,0014	Densidad	0,0004	<0,0001	<0,0992	s/d

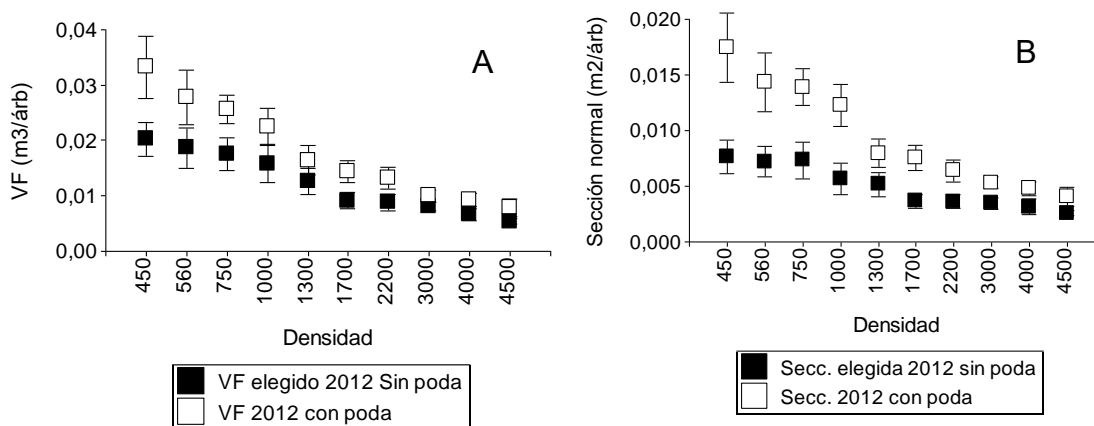
Gráfico 16. Gráficos de puntos: Esfuerzo de poda (VFe-VF/VFe) en plantas sin poda y esfuerzo de poda en las plantas con poda (VR/VF) en función de la densidad para cada año de medición.



La poda generó un crecimiento concentrado en el único fuste, lo que mejora la calidad del producto. El eje elegido de plantas sin poda fue en promedio para el año 2012,

un 30% menor que el volumen de fuste de las plantas podadas (gráfico 17 A). En cuanto a la sección normal elegida, la misma fue, en promedio, un 40,2% menor respecto a la sección del eje único de las plantas podadas. Esto quiere decir que la pérdida de concentración del crecimiento en un único fuste es mayor que la pérdida del crecimiento por poda (gráfico 17 B).

Gráfico 17. A - Volumen de fuste elegido de plantas sin poda (cuadrado negro) y volumen de fuste único de las plantas con poda (cuadrado blanco) en el año 2012 en función de la densidad. B – Sección normal elegida de plantas sin poda (cuadrado negro) y sección normal de fuste único de las plantas con poda (cuadrado blanco) en el 2012 en función de la densidad

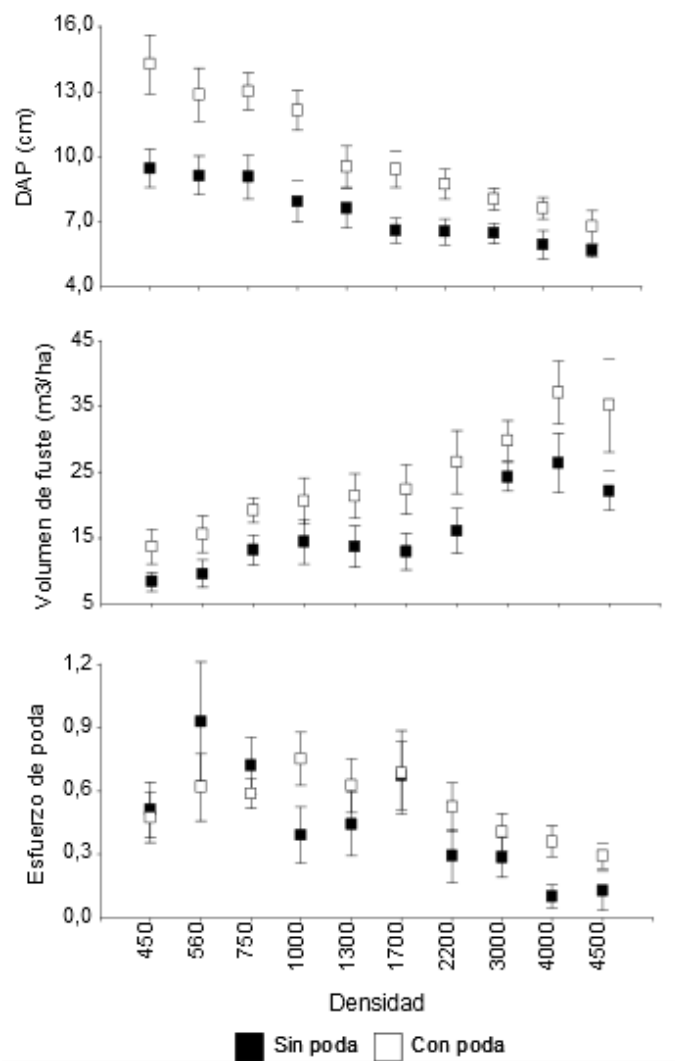


En general, al finalizar el período del ensayo, el DAP promedio de los árboles creciendo en las densidades menores a las 1000/ha alcanzaron casi el doble de valor que el de los árboles creciendo a mayor densidad. Así, el máximo valor de DAP se encontró en la menor densidad (15,8 cm de diámetro).

Tomando en cuenta el VF por hectárea de las parcelas podadas de las mayores densidades, si bien es casi el triple respecto a las menores densidades, el diámetro de las plantas que están en baja densidad es, en promedio, un 44% mayor. Para las menores densidades, las plantas podadas mostraron un VF mayor, aproximadamente un 26%, que las plantas sin poda (gráfico 18). En términos generales, el esfuerzo de poda fue mayor

en las menores densidades de plantación, sin embargo, como se analizó anteriormente, para el 2010 ya no fue necesaria la poda.

Gráfico 18. Gráfico de puntos del DAP promedio por densidad, volumen de fuste medio por hectárea y esfuerzo de poda medio acumulado hasta el 2012.



4.4. Análisis de la relación densidad-tamaño del árbol

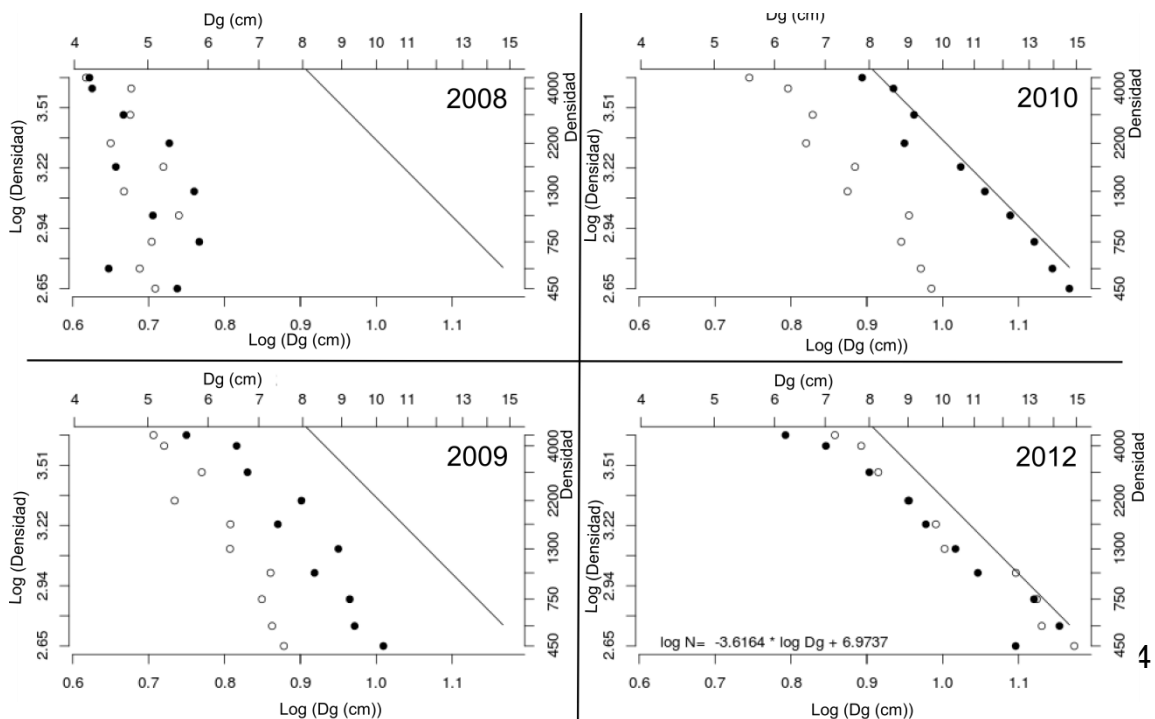
La pendiente del modelo que relaciona ambas variables fue igual a $\beta = -3,616$, la cual se graficó como línea de autorraleo (gráfico 19). El crecimiento en el primer año de

medición (2008) no mostró diferencias significativas entre podadas y no podadas, no superando los 6 cm de diámetro de tamaño promedio. Durante el segundo año las plantas sin poda aumentaron hasta 4 cm de diámetro (D_g) superando el valor de las podadas en más de 3 cm.

En el tercer año las plantas podadas muestran una pendiente similar y se acercan a la línea de autoraleo, sin embargo los tamaños (diámetro cuadrático medio, D_g) de las mismas no superaron los alcanzados por las plantas sin poda en el año 2009 (gráfico 19). Durante este período los sin poda alcanzaron en su mayoría a los valores de la línea de autoraleo (tamaño máximo en relación a la densidad de plantación).

Para el quinto año (2012), el D_g de las plantas sin poda disminuyó dada la muerte de algunas de las ramas que aportaban al G del rodal. De esta manera, al momento de finalización del ensayo, el tamaño de los árboles de ambos tratamientos (poda y sin poda) alcanzaron los máximos niveles para la densidad de plantación.

Gráfico 19. Evolución por año de la relación del diámetro medio cuadrático (D_g) y densidad (árboles/ha) de plantas sin poda (círculos negros) y con poda (círculos blanco). En cada gráfico está trazada la línea de autoraleo. (los ejes logarítmicos se transformaron en el eje opuesto en escala aritmética).



5 - Discusión

De manera general debe destacarse la practicidad, versatilidad y un mayor impacto visual de los espaciamientos evaluados empleando el diseño Nelder, que permitió observar de manera práctica el efecto de la poda y el distanciamiento de plantación en el crecimiento y la calidad del fuste del algarrobo blanco. Este diseño facilita el análisis de distintos aspectos modelados por la competencia. Se podrían nombrar diversos ejemplos de estudios que han aplicado esta metodología para distintos análisis en todos concluyen de manera común sobre la practicidad del método (Lemoine 1980, Eastham et al. 1990, Galiński et al. 1994, Knowe and Hibbs 1996). Así, es importante remarcar que se observaron diferencias de crecimiento y calidad comparando los fustes entre distanciamientos, sumado a las diferencias entre plantas podadas y no podadas. Al tercer período de crecimiento, el efecto de la densidad repercutió en la forma de las plantas haciendo que en las mayores densidades las plantas crecieran rectas y menos ramificadas que las que lo hicieron a menores densidades, en donde se observaron tallos más gruesos, tortuosos y ramificados.

Discutiremos por objetivos específicos para brindar de manera ordenada lo relevante de cada situación observada.

5.1. Caracterización de la intercepción de la radiación solar de plantaciones de *P. alba* en relación a la densidad y área foliar del rodal

La caracterización de la intercepción de la radiación por medio del dosel de esta especie a diferentes densidades y esfuerzos de poda es un avance en el cultivo del

algarrobo que permite una discusión y prospectiva más precisa del desempeño de las plantaciones, siempre teniendo como objetivo la producción de madera. La radiación que llega y tendría efecto sobre los fustes está regulado principalmente por el dosel del rodal, por lo que existe un efecto de auto-regulación dado por el crecimiento de las copas. Así, se menciona que la respuesta manifestada en *Prosopis* a la competencia intraespecífica suele darse a través de modificaciones de la estructura de la madera y/o del área foliar por planta y no por el ajuste de procesos fisiológicos de la hoja (Heitschmidt et al. 1988, Ansley and Trevino 1998). Si bien no se analizó la plasticidad en el fuste dado por la intercepción de la radiación de las hojas, empíricamente podría decirse que no afectó la forma del mismo a pesar de la variación en el PRI. De manera contraria, sí se pudo relacionar la dinámica de la copa y del crecimiento en general, al cambio de la intercepción de la radiación (tabla 3, 4 y 5; gráfico 2, 3, 4 y 5).

En términos generales, el límite de desarrollo de la copa verde de un árbol estaría limitado por la cantidad de radiación solar que llega a la base de la misma. En este estudio, los valores de AF siguieron la tendencia general observada en plantaciones forestales, en donde se verifica mayor AF a nivel de árbol en densidades relativas bajas dado que la intercepción de la radiación es menor y por ende, la intensidad lumínica a lo largo de toda la copa es mayor. En el gráfico 2 se observa que el AF de las podadas llega a la mitad de los valores de las sin poda, esto podría indicar por otro lado eficiencia del AF remanente en las podadas si se observa el crecimiento del fuste.

Se ha expuesto también que los árboles creciendo a bajos niveles de competencia intraespecífica (mayor distanciamiento), desarrollan mayor cantidad de área foliar individual en comparación con los árboles de la misma edad que crece en rodales más densos (Long et al. 2004). En bosques de *Aristotelia chilensis*, (Repetto-Giavelli et al. 2007) observaron que las hojas de los árboles eran más grandes en los rodales de mayor

densidad y que esto generaba que el AF individual fuese un 15% mayor que en los árboles de rodales disturbados con menor densidad. Estos autores argumentaron que las hojas de los bosques fragmentados (de menor densidad) tenían menor área por hoja (para disminuir la pérdida de agua al reducir su superficie foliar) respecto a los bosques más densos . En *Prosopis glandulosa*, encontraron que las altas densidades de plantación afectaron negativamente el AF individual, ya que el AF de las plantas creciendo en estas densidades no aumentó respecto al valor inicial del ensayo, mientras que en las menores densidades aumentó aproximadamente el doble tanto en plantas podadas como no podadas (Ansley and Trevino 1998). Este crecimiento diferencial fue atribuido a una mayor luminosidad disponible para el árbol, lo que provoca un aumento de follaje especialmente en la base de la copa. Esto también permitió que las ramas basales continúen creciendo. Un patrón similar se describió en coníferas. Así, la cantidad de radiación mínima en la que se observó hojas vivas fue de un 11% con respecto a la cantidad de radiación en el ápice de la copa, independientemente del grado de competencia entre individuos (Gyenge et al. 2012). De esta manera, la cantidad de radiación dada por la densidad influenciaría el desarrollo de la copa, incluyendo la capacidad de generar AF en las zonas bajas de la misma.

En nuestro estudio se observó que en las densidades mayores a 1000 plt/ha no se diferenciaron los valores de AF en los árboles con y sin poda, ni superaron los 20 m²/árbol de AF (gráfico 2). Es interesante destacar que este valor de AF es semejante al de algunas publicaciones, por ejemplo, en *Prosopis juliflora* se midieron valores medios de 23,39 m²/plt (Fleming et al. 2003) y en árboles adultos de *Prosopis glandulosa* de 4,5 metros de altura promedio 17,1 m²/plt (Ansley et al. 1992), algunos autores encontraron valores mayores como (Heitschmidt et al. 1988) de casi 48 m² de AF en mezquite (*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*). Esto sugeriría que durante el período del ensayo se alcanzó

un punto de saturación o de máximo desarrollo del AF para la cantidad de radiación incidente, más allá del tratamiento de poda. Respecto a la interacción densidad-poda se observó que el AF fue mayor en los árboles creciendo en las menores densidades y en árboles sin poda, por lo cual la poda disminuye el AF sumado al efecto de competencia dado por la densidad de plantación. Se han detallado distintas respuestas de las plantas ante la poda, las que generalmente responden a una recuperación de la capacidad fotosintética total del dosel. Así, se describen mecanismos relacionados que van desde un aumento de la fotosíntesis del remanente del AF, al aumento de la conductancia estomática que también produce un incremento en la captura de C (Pinkard and Beadle 2000), hasta una compensación de la pérdida de hojas produciendo más follaje luego de la poda (Sundberg et al. 1993, Tschaplinski and Blake 1995, Cetina-Alcalá et al. 2001, Takiya 2010). En cualquier caso el desequilibrio del balance de carbono de la planta puede conducir a una reducción significativa en el crecimiento si el AF extraída supera los mecanismos de compensación. Por estas razones, el impacto de la poda en el crecimiento depende de la interacción entre las características fisiológicas de cada especie y la disponibilidad de recursos.

Nuestros resultados indican una mayor tasa de crecimiento del AF en las plantas podadas y más marcado fue el efecto en las densidades menores de 1000 plt./ha (más del 100% de incremento) por lo que dicho efecto fue dependiente de la densidad de individuos, por ejemplo en otros estudios no se encontró diferencias en la tasa de desarrollo de la copa al comparar plantas podadas y no podadas, sin embargo sí encontró una interacción de la poda con el raleo (Muñoz et al. 2008). Esto indicaría que si bien la poda individualmente no tiene efecto, sí lo tiene de manera combinada con el raleo, ya que la eliminación de ramas basales deficitarias en aporte de fotosintatos combinada con raleos, aumentan la luminosidad del interior de la plantación, haciendo posible el

incremento de la superficie foliar, especialmente en la base de la copa viva. Entonces, el incremento porcentual mayor del AF en las plantas con poda en el presente estudio podría explicarse dado el ambiente más iluminado logrado con la poda. Así, en el año 2010, la altura de poda ya había alcanzado los 2 metros o más en los fustes de los árboles. Así, las plantas podadas mostraron una mayor tasa de recuperación después de esta intervención incrementando casi el doble el AF que las no podadas. Aun así, en las menores densidades (450, 560 y 750 plt./ha) no lograron alcanzar los valores de AF de las plantas sin poda. A pesar de los cambios en la tasa de crecimiento del AF en las parcelas más ralas, no es posible saber si existió alguna respuesta a nivel de hoja, lo que sería interesante de analizar para comprender mejor los mecanismos de compensación desarrollados por la especie.

Se observó un *plateau* del desarrollo del AF en las mayores densidades de árboles sin poda a partir del año 2009, mientras que para las menores densidades, la saturación se inició recién en el 2010. En las densidades de 450, 560 y 750 plt./ha, los árboles podados mostraron un menor desarrollo de AF que los no podados (24 m²/árbol y 40 m²/árbol, respectivamente) por lo cual es posible que, si bien la eliminación de ramas basales aumentaron la luminosidad al interior de la plantación en las plantas podadas, el AF extraída supera el AF compensada por el crecimiento luego de la intervención. Las plantas podadas no mostraron saturación del AF hasta el 2012, inclusive los mayores valores alcanzados fueron un 50% menor que los de las plantas sin podar. Basado en estas observaciones las plantas podadas siguieron creciendo a pesar de su pérdida de AF dado por la poda, pero también con esta práctica se disminuyó la competencia intraespecífica por radiación, por lo cual podría indicarse que la poda es necesaria en cualquier caso para mejorar la calidad de la madera a pesar del compromiso de AF.

El análisis del esfuerzo de poda, definido como la relación $AF_{\text{extraída}}/AF$, explica

la relación entre la respuesta compensatoria y la intercepción de la radiación. Así, en las menores densidades de plantación, existe un mayor espacio entre plantas y por ende, menor intercepción de la radiación. Bajo estas circunstancias, esta relación aumenta (dado que debió podarse más) apoyando la primera hipótesis, la que indica que el sombreado regula la brotación luego de una poda en la zona de fuste. Un resultado que sigue el mencionado patrón se observó a lo largo de los años de duración del ensayo. Así, el rebrote fue disminuyendo a medida que crecieron los árboles. Este crecimiento significó un aumento de cobertura del dosel, dado el acercamiento de las copas, con el consecuente aumento de la intercepción de la radiación. Finalmente, para el año 2012 ninguna planta rebrotó en el fuste de las plantas podadas. Esto demostraría que la falta de luz no permite que las yemas emitan brotes epicórmicos.

Existen umbrales de raleo que pueden llevar a una disminución transitoria o permanente del AF del rodal, dependiendo esto del sitio y la especie (incluyendo la edad de los individuos; (Rodríguez et al. 2002, Hennessey et al. 2004, Muñoz et al. 2008)). Sin embargo, también es posible hipotetizar que la capacidad de generar brotes epicórmicos disminuya con la edad del árbol a pesar de que estén dadas las condiciones de radiación. Por ejemplo algunos estudios (Medhurst and Beadle 2001, Munka et al. 2013), concluyeron que en plantaciones menos densas logradas con raleo los árboles tienen mayor AF, pero si son raleadas en exceso, es poco probable que vuelva a cerrarse el dosel completamente.

En cuanto al IAF, los valores en promedio general fueron de 1,1 a 4,99 para todos los tratamientos evaluados de *P. alba*, siendo mayores que los mencionados para bosques y matorrales de *Prosopis* spp. en otros lugares y creciendo naturalmente. Por ejemplo, se encontró en *Prosopis* sp., valores de 1,2 a 1,5 en verano y menos de 0,2 en invierno (Dzikiti et al. 2013), ya que los algarrobos pierden la mayoría de sus hojas en la época

invernal. En *P. glandulosa* en el desierto de Sonora se estimaron valores de IAF de 1,44 a 3,5 (Sharifi et al. 1982), otros midieron en *P. glandulosa* var. *glandulosa* valores de entre 1,1 a 2,2 (Asner et al. 1998). Más allá de que en el ensayo evaluado se había realizado una plantación cuidando la sobrevivencia inicial de plantas, a diferencia de lo que puede ocurrir en sistemas naturales donde múltiples factores afectan la dinámica de las especies arbóreas, el hecho de que se hayan podido alcanzar IAF tan altos puede deberse posiblemente a la presencia de la napa cercana.

Como las plantas fueron observadas hasta el año 2012 (7 años desde la plantación) es posible que los individuos podados no hayan llegado a la saturación total del AF sobre todo en las menores densidades, siendo esto una posible explicación a la causa de que las mayores densidades alcancen mayores valores de IAF que las bajas densidades. Los resultados también indican que a altas densidades de plantación, el IAF tiende a disminuir con el tiempo. Así, a partir de las 3000 plt./ha en el tratamiento sin poda, el IAF disminuye posiblemente explicado por haber alcanzado la máxima ocupación y uso de la radiación incidente. Esto no es exclusivo de la especie sino que es un fenómeno general en rodales coetáneos, asociado al patrón de disminución de la tasa de crecimiento (y de uso de recursos) de los bosques luego de un pico de productividad a determinada edad (particular para cada especie en interacción con el sitio) (Gower et al. 1996, Smith and Resh 1999, Gyenge et al. 2009, Fernández Tschieder 2011). Es así que, cuando no hay intervención externa, el dosel se desarrolla y se estabiliza a un determinado nivel de luminosidad, momento que corresponde al cierre del dosel, para luego disminuir en distinta medida.

En el presente estudio, el cierre del dosel si bien se dio en ambos tratamientos de poda, hay cierta apertura debido a la intervención, o cambios en la estructura del dosel, por lo cual se observa que el incremento de área foliar sigue en aumento en las plantas podadas, y el PRI sigue siendo menor en parcelas con plantas podadas y de menor

densidad (450 y 560 plt/ha). Un fenómeno similar se ha reportado por ejemplo en *Pinus taeda* (Fernández Tschieder 2011) ante intervenciones de raleo. En el tratamiento control, el AF del rodal disminuye paulatinamente luego del pico a temprana edad, mientras que los rodales raleados incrementan su AF luego de cada intervención, superando la del rodal no intervenido para la misma edad y sitio. Esto sugiere que, para un mismo sitio, la liberación relativa de recursos que produce la intervención silvícola (poda y/o raleo) induce cambios en el crecimiento individual y productividad general de los rodales, en parte acompañados o como consecuencia de cambios en la asignación de biomasa dentro de la planta.

Por todo lo expuesto, debe destacarse y enfatizarse que la realización de podas independientemente de las densidades de plantación elegida en las plantaciones de algarrobo blanco en los primeros años, generó fustes de mayor calidad maderera. Por otro lado, se determinó que en el rango de densidades mayores de 1000 plantas/ha, se necesitarían raleos frecuentes y a corta edad de la plantación. Ambos aspectos determinan que para la producción de madera de esta especie se aconsejan densidades de plantación menor a las 1000 plantas/ha y podas frecuentes en los primeros años de plantación.

5.2. Producción de brotes epicórmicos en relación a la magnitud de poda y la intercepción de la radiación

Los estudios de gestión forestal han demostrado que el número de brotes epicórmicos que se forman en el tronco después de los tratamientos silvícolas como raleo, podas o fertilización, responde a factores estimulantes de esta respuesta compensatoria, que serían el resultado de efectos combinados de una capacidad fotosintética reducida (es decir, la pérdida de follaje) y una mayor exposición a la luz o el calor (Büsgen, M., & Münch 1929, Blum 1963, Zimmerman and Brown 1971, Pinkard and Beadle 2000, Pallardy and Kozlowski 2008, O'Hara et al. 2008, Takiya 2010, Meier et al. 2012). Por

lo cual se discute la variación en la producción de brotes en función de los tratamientos de poda y el distanciamiento entre plantas.

La capacidad de generar brotes epicórmicos es una adaptación evolutiva que permite a los árboles reconstruir rápidamente sus copas después de perturbaciones tales como defoliaciones y o daños en las ramas (Bégin and Fillion 1999, Ishii and Ford 2001, Ishii et al. 2002). En el caso del manejo, la poda de ramas se asimila a alguno de estos tipos de factores estimulantes, por lo que este mecanismo evolutivo se dispararía inducido por esta práctica silvícola. Como mencionamos, la magnitud de la radiación solar *per se* no es necesariamente un mecanismo que dispare este fenómeno en todas las especies. Así, en alerce sugirieron que un ambiente más iluminado dado por una mayor poda de los fustes, o la misma poda pero en árboles de copa de menor tamaño (por lo cual había más luz), favoreció la brotación y persistencia epicórmica en dicha especie (O'Hara and Valappil 2000). En otro estudio, que también probaría la importancia de la radiación en la activación de las yemas epicórmicas, anillaron un rodal de roble logrando disminuir la densidad pero sin disminuir demasiado la radiación disponible por la presencia de los árboles muertos en pie (Reque and Bravo 2007). En este caso, no se produjo la activación de las yemas epicórmicas. Sin embargo, otros autores describen lo contrario, indicando que el brote epicórmico no es estimulado por el aumento de la exposición de las yemas epicórmicas a la luz en las menores densidades, y que la luz no es normalmente un factor importante del control de la emergencia del brote epicórmico (Wignall and Browning 1988). Así, la disminución de la calidad de la madera asociada con brotes epicórmicos producidos por la menor densidad sería el resultado de una promoción a largo plazo del crecimiento de la rama epicórmica, coincidiendo con Meier et al. (2012). Otros también concluyeron que salvo raleos de alta intensidad que extraen más del 50% de la densidad en rodales de roble blanco, el raleo no afecta notablemente la calidad del fuste, y que con

el tiempo el número de brotes epicórmicos disminuye (Dale and Sonderman 1984).

Siguiendo con los ejemplos, una serie de trabajos también concluyeron que la luz no juega un papel importante en la aparición del brote epicórmico, si no que los árboles con bajo crecimiento radial tienen una mayor propensión a formar ramas epicórmicas, siendo esto un indicador de poco vigor (Smith 1977, Wignall and Browning 1988, Bardon et al. 2010). Otro estudio apoya esta teoría concluyendo que la influencia de la luz sobre la brotación epicórmica no es cierta, pero ramas epicórmicas recién formadas son mucho más vigorosas en ambientes con más luz (Meier et al. 2012). También se menciona que el estrés estimula la brotación de yemas más cercana a los daños, y que sin daño significativo, la ubicación de los brotes se relacionaría con la yema de desarrollo. Así, se reporta también una correlación entre daño producido por la poda y la brotación. Diversos estudios reportan que el número y tamaño de los brotes epicórmicos aumentan con la severidad de la poda (Stein 1955, Eckstein, E. 1974, Waring and O'Hara 2005, O'Hara et al. 2008). En pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) observaron que tanto podas ligeras (20% de la copa viva) y podas moderadas (40% de la copa viva) no generaron respuesta compensatoria, mientras que las podas severas (más del 60% de remoción de la copa) generaron la disminución de la calidad del fuste dada por la proliferación de brotes epicórmicos (Collier and Turnblom 2001). Otro factor predisponente a las formaciones epicórmicas es la época en el cual se poda, debido a la carga hormonal, y la asignación anual de carbono que puede regular la ramificación epicórmica (Meier et al. 2012).

El factor nutricional también podría influir en la magnitud de la respuesta. En forestaciones de roble (*Quercus rubra* L.) y álamo amarillo (*Liriodendron tulipifera* L.) atribuyeron mayor vigor y crecimiento de las ramas epicórmicas en la zona alta del tronco, luego de dos años de fertilizar con N, P y K (Auchmoody 1972).

Finalmente, otro factor mencionado se refiere a la posición por estratos de

competencia, ya que plantas dominadas con valores altos de relación altura/diámetro (altos y de poco diámetro), por lo general presentan brotes epicórmicos (Nicolini et al. 2003), coincidiendo con la interpretación de la asociación entre brotación y situaciones de estrés y poco vigor del árbol.

Más allá de lo expuesto, en general, la comparación de las variaciones atribuidas a cada uno de estos efectos aleatorios (calor, luz, efecto hormonal o nutricional, posición social de los individuos, etc.) sugiere que en cualquier nivel de severidad de poda, las diferencias en la brotación epicórmica entre distintos genotipos y sitios se expresan inmediatamente después de la poda y luego desaparecen a lo largo de varias temporadas de cultivo, como se observó también en el presente trabajo.

En cuanto a experiencias en *Prosopis*, evaluaron la recuperación del área fotosintética después de una poda a los 6 años en *P. flexuosa* (la poda que se realizó fue de formación dejando un tallo central o principal, manteniendo otro grupo de plantas sin intervenir). Estos autores concluyeron que la poda induce una rápida recuperación del área fotosintética en detrimento del crecimiento en diámetro inmediatamente después de la poda (Alvarez et al. 2013b). También describieron que los individuos podados presentaron un mayor número, diámetro y longitud de rebrotes que los individuos control en todas las clases de diámetro. Basado en estos resultados, sugirieron que el control de crecimiento es impuesto por el manejo del área fotosintética y recomiendan que la poda podría mejorar la forma de *Prosopis* en el corto plazo, y aumentar el crecimiento en diámetro del tallo en el largo plazo.

En nuestro trabajo, se comparó el NR extraídas entre plantas podadas, no encontrando diferencias el primer año de medición entre densidades debido a que las plantas al momento en que se efectuó la primera poda de formación (no registrada) anterior al 2008, eran pequeñas y similares en su tamaño, inclusive las plantas de las

mayores densidades aún no estaban en competencia intraespecífica. En el año 2009, comenzó a influir el tamaño de las copas en las mayores densidades, ya que al crecer, comenzaron a cerrar el dosel aumentando la intercepción de la radiación (gráfico 6) por su cercanía, determinando un mayor sombreado y menos brotes en las altas densidades. Sin embargo, en términos generales no se observó una tendencia marcada hacia un menor número de brotes a medida que aumentaba la densidad, aunque sí diferían en tamaño (gráfico 7). Los brotes epicórmicos que rebrotaban en las heridas de la poda sobre el fuste, eran de mayor tamaño y crecían con mayor vigor en las menores densidades donde estaba más iluminado el fuste. Esto indicaría que la luz es un factor vigorizante o activador de este tipo de ramas en *Prosopis*, corroborando la primera hipótesis de que a un mayor nivel de sombreado, menos biomasa de ramas podadas son generadas por respuesta compensatoria en la zona de fuste, estando esta menor biomasa más asociada al tamaño individual de las ramas que al número de las mismas.

En el año 2010 el NR disminuyó a valores cercanos a los del 2008, lo cual puede ser consecuencia, al menos en parte, de la poca luz existente en todas las densidades. En el 2012, ningún fuste generó ramas epicórmicas en el fuste, pero se observó que el PRI de densidades menores a 1000 plt/ha no superó en promedio el 50%. Esto podría estar indicando que estas densidades todavía no saturaron el espacio de crecimiento de sus copas, sin embargo, el nivel de sombreado de los fustes es suficiente para que ninguna planta rebrote luego del 2010. Otra alternativa es la mencionada en la bibliografía (Meier et al. 2012), que sugieren que en tallos viejos los brotes epicórmicos iniciales llegarían a una etapa más allá de la cual no son capaces de brotar y el potencial epicórmico del tronco se vuelve insignificante. De todos modos, es difícil pensar en tallos “viejos” en plantas jóvenes como las evaluadas, sin embargo, no podemos descartar que la edad no sea un factor que influya en las respuestas observadas en *P. alba*.

El valor medio de ramas extraídas que se observaron indica una alta capacidad de rebrote de la especie, teniendo en cuenta que otros autores encontraron en promedio para varias especies norteamericanas de *Prosopis* un promedio de entre 1 a 2,8 ramas por metro de tronco, otro 1,78 ramas por árbol (no por metro) (Della-Bianca 1972), y otros entre 2,8 y 8,5 ramas por árbol (Miller and Stringer 2004). En nuestro ensayo, se encontró en promedio de 1 a 5,5 ramas por metro de tronco, lo que equivale a 2,6 a 12 ramas por árbol (gráficos 6 y 12). Al extrapolar los valores individuales de ramas a hectárea, considerando el número de individuos en esta unidad de superficie, se observa que la biomasa de ramas aumenta hasta 6 veces en las mayores densidades (gráfico 10), con una producción acumulada (de 2008 a 2010) de varias toneladas (ver más abajo). Estos resultados demuestran que, en un marco de decisiones silvícolas-prácticas, es impracticable en plantaciones comerciales manejar masas tan densas para obtención de madera de calidad, pero puede significar una práctica atractiva si se plantea la generación de biomasa.

A diferencia del número de ramas, el tamaño, peso y volumen individual de las ramas por árbol sí presenta un comportamiento de disminución claro con la densidad de plantación (gráficos 9,10 y 11). En las menores densidades se produjeron ramas de mayor tamaño y sección, encontrando que el mayor valor de sección, volumen y peso de rama por árbol se dió en 1000 plt/ha. Esto concuerda con lo reportado en plantas jóvenes de *P. flexuosa*, con valores de entre 6 a 12 kg de ramas por planta (Alvarez et al. 2013a), los que fueron cercanos a los registrados en nuestro trabajo.

En las densidades de 450 y 560 plt/ha, la biomasa de ramas extraídas sumando todos los años, no superó los 5000kg/ha (promedio de 8,9 a 11,1 kg por árbol). En el caso de la densidad de 1000 plt./ha, la biomasa alcanzó cifras de 9500 kg/ha (9,5 kg/árbol). En las mayores densidades, de 1300 a 4500plt/ha, el promedio por hectárea fue de 7300 kg/ha. Estos valores son relevantes dado que el número de ramas es tan elevado que

dificulta el manejo con poda, lo que justifica el manejo de ramas de mayor tamaño, pero en un número mucho menor (a nivel de hectárea) en las menores densidades. Para tener una referencia, en una plantación de olivos con riego y fertilización, y con una densidad de 170 plt/ha, se extraen 1310 kg.MS/ha si es practicada la poda anual, mientras que el valor asciende a 3020 kg.MS/ha en la poda bienal (Velázquez-Martí et al. 2011). Estos valores también demuestran la elevada productividad del algarrobo en zonas con napa freática cercana.

Profundizando este planteo y teniendo en cuenta que la intensidad de poda fue semejante para todas las plantas, dado que se podó con idénticos criterios silvícolas preestablecidos, la densidad afectó la respuesta observada a nivel de brotes epicórmicos (calidad de la madera). Se observó en el fuste que en los años de estudio tanto el crecimiento de las plantas y la producción de ramas luego de las podas se incrementaron en promedio, de $89\pm 19\%$ desde el 2008 al 2009, y luego disminuyó a un $45\pm 5\%$ en el periodo 2009 al 2010. En el año 2012, dada una mayor intercepción de la radiación por el cerrado de las copas, el sombreado del fuste detuvo la aparición de brotes por lo cual la poda no fue necesaria a partir del 2010 en ninguna densidad. Coincidente con esto, se observó en *Prosopis* que la emisión de brotes fue menor después de la segunda poda (Atanasio 2014).

El modelo hipotético propuesto también plantea que a mayor distanciamiento entre plantas la intercepción de la radiación disminuye por lo cual la calidad de los fustes se empobrece dado que, si bien no hay mayor número de brotes, el tamaño de las ramas, su peso, sección y volumen tiene mayores valores en las menores densidades. Esto produce un mayor tamaño de las cicatrices de poda que genera una menor calidad del fuste. Así, en un intento de reconciliar entre el esfuerzo de poda y la maximización de la calidad de fuste, es posible plantear el empleo de densidades no mayores a 1000 plt./ha

podadas para lograr en el corto plazo, un fuste único y sin necesidad de realizar más podas de ramas.

5.3. Determinación del efecto interactivo de intensidad de poda y densidad de individuos en la calidad y volumen de fuste maderable

En total se realizaron 6 podas durante el período de estudio, a una tasa de dos por año, una en verano (diciembre-enero) y otra en invierno (julio-agosto) desde el 2008 al 2010. Si bien existen evidencias de que la poda de verano es más beneficiosa manteniendo altas tasas de crecimiento en las plantaciones jóvenes (debido a que el aumento del nitrógeno foliar, la conductancia estomática y la disminución de las proporciones isotópicas de carbono foliar permitirían a los árboles recuperarse de la poda más rápidamente que los árboles podados en otoño o primavera) (Maurin and DesRochers 2013). La poda de invierno sirvió para mantener la proporción de poda de no más del 30% de la altura de la planta, ya que en esta época se podaron las ramas dejadas en el verano para no pasar de esa altura, las rebrotadas después del verano y las de menores diámetros de cuello.

No se podó más del 30% de la altura de la planta por poda en ningún caso hasta lograr un fuste de por lo menos 2,2 a 2,5 m. de altura. El criterio de poda que determina extraer las ramas antes de que superen los 3 cm de diámetro en su cuello sin importar el momento de extracción, asegura la calidad de la madera. Por otro lado, es sabido que la poda no solo mejora la forma sino que también, y de acuerdo a ciertos umbrales, puede estimular el crecimiento. Así, en *Prosopis glandulosa var. glandulosa* el mayor crecimiento se produjo en los tratamientos que fueron podados y donde se controlaron las malezas entre líneas (Patch and Felker 1997a). Este resultado se debió a la reducción de la parte menos eficiente de la copa en cuanto a la fijación de carbono, sumado a una disminución en la competencia por agua del suelo (Patch and Felker 1997b). Además del

fuste, estos autores determinaron que estos árboles podados incrementaron un 60% más de biomasa de follaje en comparación a los árboles no tratados. En esta tesis, si bien no se manejó la maleza, también se observaron mayores productividades y producción de madera (gráfico 12, 13, 14, 15, 17 y 18; tablas 12 y 13).

El crecimiento del volumen de fuste medido en esta tesis (rangos de los valores medios de volumen de fuste 0,03-0,006 m³/árb y 14-27 m³/ha en no podadas y de 0,03-0,008 m³/árb y 15-35 m³/ha en podadas) se relaciona con datos recabados en otras especies de *Prosopis*. Como valores de referencia, podemos citar valores de rodales naturales de *Prosopis ruscifolia* Griseb., de 2,5 m³/ha/año en una densidad de 200 plt./ha (Maldonado 2007), volumen total para *Prosopis leavigata* de 0,028 m³ por árbol y 41,33 m³/ha/ año a una densidad de plantación de 1750 plt./ha (Foroughbakhch et al. 2005). Valores de volumen en pie de fuste con corteza de 208,9 m³/ha en un rodal de 6 años de *Prosopis juliflora* plantados a una densidad de 1548 plt./ha (Maghembe et al. 1983). Para individuos de un diámetro a la base de entre 15-20 cm y 6 metros de altura total determinaron con tablas volumétricas un volumen individual de 0,054 m³/árb (Pasiiecznik et al. 2001). Incluso datos de la misma zona (zona de riego de la provincia de Santiago del Estero), se midieron volúmenes individuales medios de *Prosopis alba* de 0,0598 m³/plt. en plantaciones de 14 años (densidad 525 plt/ha.) y de 0,1009 m³/plt en una de 20 años de edad (densidad 400 plt/ha) (Coronel de Renolfi et al. 2014).

El crecimiento acumulado de VF varió entre rodales podados y sin podar en el transcurso del ensayo. Las diferencias solo se observaron al inicio del ensayo entre los volúmenes de los árboles podados y sin podar creciendo a similares densidades, sino que paulatinamente se fueron incrementando en la medida en que la intercepción de la radiación aumento por el crecimiento del dosel. En la misma dirección planteada en la segunda hipótesis, a nivel individual las plantas de las parcelas de menor densidad de

plantación crecieron más. Sumado a ello, la poda tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento del fuste, ya que al final del estudio, las plantas podadas alcanzaron un mayor tamaño de fuste que las plantas sin poda (tal como se mencionó anteriormente). Otro aspecto positivo fue que con la poda, se logró que el crecimiento se concentre en un único eje (máximo $V_{F_{podadas}} = 0,033 \text{ m}^3/\text{árb.}$ y $35 \text{ m}^3/\text{ha}$) mientras que en las plantas sin poda, todos los ejes mostraron bifurcamientos o una alta ramificación.

En cuanto a la sección de los fustes, las diferencias entre árboles también fueron observadas después del 2009, lo que confirma que a partir de esta edad (4 años desde la plantación) la densidad comenzó a afectar el crecimiento para las densidades estudiadas. Desde un punto de vista del manejo silvícola, este momento estaría determinando la necesidad de aplicar un raleo para las mayores densidades (1300 plt/ha. o más) ya que las secciones no aumentan o el aumento es mínimo (hay disminución del crecimiento). Se observó además, que el mayor valor de G alcanzado es de $23,3 \text{ m}^2$ (sin poda) en el 2010, y que ese valor disminuyó en el 2012 debido a la muerte de algunas ramas que aportaron a la sección acumulada de los árboles sin poda. En el caso de los árboles podados, en el año 2012 se alcanzaron valores medios de $19,13 \text{ m}^2$ de G (gráfico 14), lo que coincide con los valores de (Senillani and Navall 2006), quienes estimaron $19,3 \text{ m}^2/\text{ha}$ en plantaciones de aproximadamente 400 plt/ha de *Prosopis alba*. Estos autores también consideraron que este valor es una buena estimación del límite de densidad de la especie, puesto que a partir de la misma comienza a notarse una fuerte competencia y reducción del crecimiento.

En cuanto al incremento del diámetro, los valores máximos medios del ICA (3,6 cm) para plantas podadas creciendo a una densidad de 450 plt/ha (tabla 11 y gráfico 15 A) son equivalentes a los medidos por Senillani and Navall (2006) para la misma edad, zona y densidad. Por el contrario, Rossi (2014) determinó un ICA de 1,39 cm de diámetro

en varias plantaciones en la provincia de Santiago del Estero. En nuestro caso la poda retrasaría el raleo ya que para el 2012 el máximo de la curva del crecimiento medio anual todavía no se sitúa en el momento donde corta a la del crecimiento corriente anual, en cambio sí sucede para las no podadas en casi todas las densidades, la intersección de curvas donde $ICA = IMA$ denota detención de crecimiento.

No se pudo determinar el máximo IMA para las plantas podadas ya que aún el incremento fue creciente al momento de finalizar las mediciones. En las plantas sin poda, ese valor se observó al 5° año (2010) con un valor de entre 1,9 a 2,1 cm de diámetro en las menores densidades (de 450, 560 y 750 plt./ha). Respecto al volumen de fuste, es mucho más marcado lo mencionado anteriormente ya que los valores de ICA e IMA están aún más alejados para las plantas podadas (tabla 12 y gráfico 15 B), incluso en el último período. Los valores calculados por hectárea (de $2\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para 450 plt./ha a $5\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para 4500 plt./ha) son elevados para esta especie, lo cual estimando un turno de corta para la zona de estudio de 20 años, es posible calcular una productividad de $45\text{m}^3/\text{ha}$. Otros antecedentes muestran que las curvas de IMA e ICA en plantaciones de la localidad de Forres y Fernández (densidad de plantación 525 plt/ha) y San Isidro (densidad de 250 plt/ha) se cortan al 9° año de la implantación (Rossi 2014). Para otra localidad, Leales, se estimó para una forestación de una densidad de 100 plt/ha, un corte de las curvas de IMA e ICA posterior a la edad de 14 años, sugiriendo un raleo a una edad más avanzada con respecto a las otras plantaciones dada la menor densidad empleada.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo y a los presentados en la bibliografía, podría esperarse que en un rodal como el estudiado y bajo un manejo forestal sostenido se logren tasas de crecimiento volumétrico promedio de $2\text{-}4\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$, lo que para un turno de corta de 20 años una hectárea podría producir entre $40\text{ a }80\text{m}^3$ de madera de calidad a una densidad final de entre 100 a 120 árboles/ha. Felker et al. (1990) estimó

que con una densidad de 111 árboles/ha es posible llegar a 42 cm de diámetro en una rotación de poco más de 40 años, sin embargo, Duff et al. (1994) estimaron llegar con manejo y material genético seleccionado a esos tamaños en un turno de 25 años.

Para otras especies forestales de alta productividad en la Argentina se estiman valores que van de 25-32 m³/ha/año en pino (turno de corta 20-25 años) y 40-45m³/ha/año en eucalipto (turno de corta 12-14 años) (Ministerio de Agroindustria 2015), si bien la diferencia productiva es notable los precios de la madera de algarrobo son aproximadamente de entre 4 a 5 veces respecto a estas maderas, con la ventaja de tener además la capacidad de crecer en sitios muy degradados en las cuales las especies mencionadas no prosperarían.

5.4. Propuesta de un modelo de manejo de plantaciones

La relación máxima entre tamaño promedio de los individuos y densidad del rodal identifica al estado de máxima competencia (Nowak 2002). Los rodales existentes sobre esta línea están en un estado de “sobre densidad” y deberían ser situaciones a ralear para mantener el crecimiento de una masa. Respecto al valor de pendiente calculado para nuestro rodal en estudio ($\beta = -3,616$) fue mayor que la recta “universal” propuesta por Reineke ($\beta = -1,605$). Pese a esta denominación, se ha demostrado que tal valor no es constante, ni siquiera para cada especie (Bravo et al. 1997). Esta variación de la pendiente entre las especies respecto de la pendiente universal no implica diferencias significativas en la producción bruta teórica del rodal (Chauchard et al. 1999), sino que cada rodal llegaría al momento de autorraleo más o menos rápido. Así, por ejemplo, en pino escocés (*Pinus sylvestris*), se obtuvieron pendientes de -1,5 a -2,0 empleando dos modelos de estimación (Reineke y de Sterba 's para probar el comportamiento del modelo de simulación) y -1,824 para abeto rojo (*Picea abies*), (Monserud et al. 2005). Para rodales de *Nothofagus* spp, Chauchard et al. (1999) determinaron un valor de -1,693.

Como mencionamos, la capacidad de carga de los rodales depende de cada especie. En el caso de algarrobo blanco, se observó que dicha capacidad es baja, ya que a los 7 años (seis períodos de crecimiento) todas las plantas sin poda detuvieron su crecimiento. Esto indicaría que en el mejor de los casos, en densidades relativamente bajas a moderadas (450 plt/ha.), *Prosopis alba* no crecerá más que 15 cm. de diámetro en promedio si no se realizan tratamientos silvícolas. Tanto es así que la poda realizada en este ensayo permitió que no alcanzaran los valores de la línea de autorraleo ni disminuir su ICA. Además es notable la poca variación del tamaño medio de plantas sin poda entre el año 2009 y 2012. De esta manera, es posible suponer una disminución de la competencia por radiación solar, lo cual les permitiría seguir creciendo a los individuos. Siguiendo este razonamiento, se podría decir de manera general, que algarrobos plantados en densidades menores a 1000 plantas por hectárea podadas serían el tratamiento más adecuado para obtener madera de alta calidad.

Los DMR no están muy desarrollados en nuestro país. Sin embargo, son de uso frecuente en otros países ya que son uno de los métodos más eficaces y sencillos para el diseño de regímenes silvícolas, incluso para estimaciones productivas de los productores forestales.

Esta herramienta (figura 20), desarrollada a partir de los resultados obtenidos, permitiría gestionar la densidad, así como controlar el nivel de las existencias mediante el espaciamiento inicial y raleos posteriores en función del objetivo planteado en cada caso. De manera paralela, también permite la determinación de la cantidad de volumen de madera, y la estimación gráfica del porcentaje de radiación interceptada por la interacción de poda y densidad inicial. El rango de densidad propuesto en el gráfico se basa en los tratamientos analizados en este trabajo, sin embargo, se extendió a menores densidades con la intención de estimar linealmente el tamaño de plantas a densidades que

posiblemente se llegaría con raleos (300, 200 y 100 plt/ha).

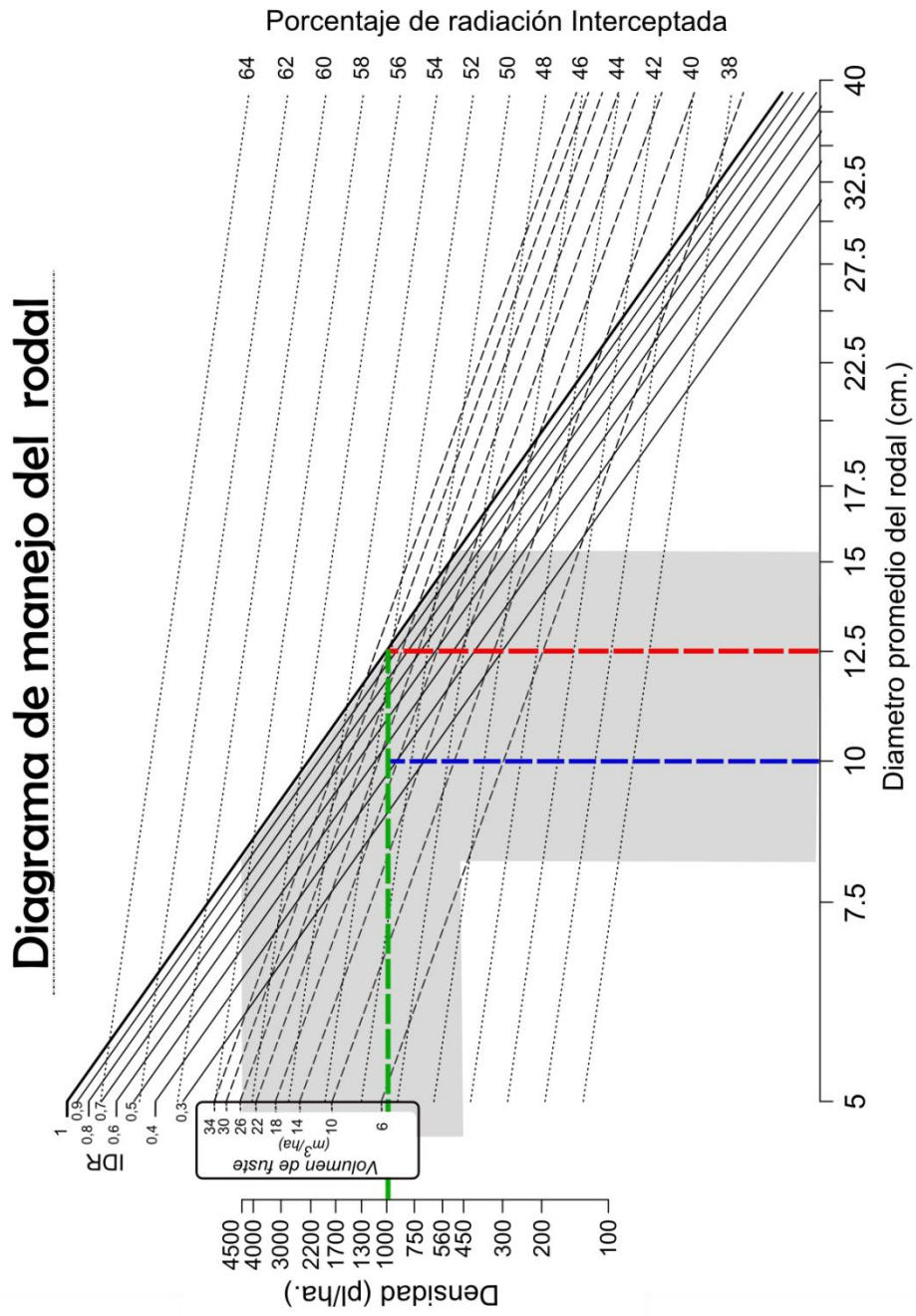
La forma de utilizar el modelo es relativamente sencilla. Así, a partir del tamaño medio de los árboles de un rodal (D_g , eje x) es posible estimar la densidad máxima (eje y) a la cual podrían seguir creciendo ($IDR=1$, líneas diagonales). En este cruce de líneas, se puede seguir la recta más cercana de VF la cual estima los metros cúbicos de fuste por hectárea del rodal, así como también la cantidad de luz que intercepta (PRI) o su inversa, la luz incidente. Así, a partir de dichos valores, es posible estimar productividad, necesidad de raleos y la posibilidad de realizar cultivos asociados a estos rodales una vez determinada la cantidad de radiación que llega al suelo. A modo de ejemplo se graficó una línea al valor de 1000 plt/ha. (línea punteada verde en gráfico 20), la cual se corta en la línea de autorraleo ($IDR=1$) indicando que a ese nivel de ocupación el tamaño medio de las plantas (D_g) es de 12,5 cm (línea punteada roja en el mismo gráfico). A partir de allí, las líneas de guiones negros (-----) indican el VF del rodal, cuyo valor más cercano es de $VF=22 \text{ m}^3/\text{ha}$. En el otro sentido, si se sigue el grupo de líneas punteadas negras (.....) es posible estimar el PRI, que en este caso, se aproxima a 52%. Por otro lado, si las plantas a esa misma densidad tuvieran un tamaño medio de 10 cm de diámetro, la ocupación del sitio no sería completa y se correspondería con un $IDR=0.4$, un $VF=15 \text{ m}^3/\text{ha}$ y un $PRI=51,3 \%$.

De igual manera podemos estimar el grado de ocupación, por ejemplo, si partimos del diámetro medio de un rodal y calculamos su densidad, mediante la intersección con las curvas de IDR es posible obtener el índice de Reineke. A la hora de representar los niveles de densidad máximos y mínimos para una masa hay que tener en cuenta los valores del índice de Reineke y los límites propuestos por Long (1985) a partir de este índice de densidad. Por encima del 60% del índice máximo de Reineke la bibliografía indica que las masas comienzan el autoraleo, sin embargo, con poda este proceso podría

iniciarse con un grado mayor de ocupación.

Cabe destacar que las máximas densidades no debieran emplearse en proyectos productivos con el objetivo de producir madera de calidad dado los altos costos de plantación que tendrían y la dificultad de manejo.

Gráfico 20. Diagrama de densidad de rodal. Relación del diámetro medio cuadrático (Dg) y densidad (árboles/ha⁻¹), esto corresponde a los IDR (el valor IDR=1 corresponde a la línea de autorraleo). La relación de Dg y densidad con isóneas de volumen de fuste en metros cúbicos por hectárea corresponde a líneas tipo: - - - - y las isóneas de porcentaje de interceptación de la radiación corresponde a líneas tipo: El área sombreada de color gris corresponde a las densidades estudiadas en este trabajo, los valores restantes son extrapolados con los modelos.



6- Conclusiones y futuras investigaciones

Debido a la disminución de la oferta de los bosques nativos, existe una creciente presión para establecer plantaciones para productos de madera maciza. La mayoría de las plantaciones de algarrobo en la provincia de Santiago del Estero se gestionaron con el objetivo principal de la producción de madera de calidad, y su fruto como subproducto. Sin embargo, en general, una vez plantadas no se le realizan las labores silvícolas recomendadas dando como resultado plantaciones con crecimiento disminuido por la competencia, fustes cortos y muy ramificados imposibles de ser empleados por la industria de la carpintería. Todo esto genera que pierda valor su madera.

A diferencia de los análisis que generalmente se realizan para caracterizar la respuesta de las especies a las distintas prácticas silvícolas, en este estudio en particular se utilizó una amplia gama de densidades combinadas con poda. Así, el diseño empleado (Nelder) fue eficiente y aportó una respuesta inmediata a temprana edad del efecto de la poda combinada con el distanciamiento debido a la competencia; esto facilitó el análisis y observaciones en los árboles respecto a valores de crecimiento y calidad de los fustes. De esta manera, este trabajo sirve como una fuente metodológica en cuanto al diseño, presentación y análisis de las parcelas de un ensayo Nelder aplicado a la investigación forestal, dado que la implementación de modelos mixtos permitió analizar las diferencias, superando además la falta de independencia espacial dada por el mismo diseño Nelder. Los efectos aleatorios tuvieron en cuenta las variaciones asociadas a la posición de los árboles y de esta manera se prescindió de las fórmulas originales de Nelder (1962) y otros métodos más complejos. Respecto a las diferencias entre PRI, la respuesta dada por los tratamientos estuvo de acuerdo con lo planteado por el modelo hipotético, donde mencionábamos que a menor distanciamiento (mayor densidad) se alcanzaba un mayor porcentaje de radiación interceptada. Por otra parte, la poda disminuye el AF de los

árboles, generando una menor intercepción de la radiación y por ende, una mayor disponibilidad por debajo del dosel arbóreo. Es así que la poda afectó al desarrollo del dosel del rodal. De hecho los valores de IAF de los rodales podados fueron de un 28% menos en promedio, de los no podados, comparando siempre la misma densidad. Los valores absolutos coinciden con los valores para otras especies caducifolias que varían entre 1,7 y 4 aunque es importante recalcar que no se contaba con valores de referencia de esta especie de algarrobo.

Otro dato interesante que se pudo generar es que, teniendo en cuenta los sistemas mixtos de producción (agroforestales o silvopastoriles), los rodales podados con menos de 1000 plantas por hectárea apenas superaron el 50% de intercepción de la radiación (PRI). Esto pone de manifiesto la práctica de la poda en este tipo de sistemas. Futuras investigaciones permitirán desarrollar las asociaciones más productivas (especies forrajeras a cultivar) atendiendo los límites biológicos que lo permitan (estrés por baja radiación, competencia o facilitación por agua, etc), con pasturas o cultivos en base a la disponibilidad de la radiación.

La respuesta compensatoria en la zona del fuste debida a la extracción de AF por poda fue disminuyendo hacia el quinto año de edad de las plantas debido al sombreado progresivo del dosel, creado por el cerramiento de las copas. Esto permitió lograr un fuste de entre 2 a 3 metros de longitud libre de ramificaciones inclusive en la menor densidad probada (450 plt/ha.) luego de 3 años consecutivos de podas, comenzando el segundo año desde la plantación y empleando los criterios de poda mencionados en la metodología.

El número de ramas por árbol de las menores densidades (450, 560 y 750 plt./ha) fue en promedio el doble de las plantas de mayor densidad (a nivel individuo), mientras que el valor llevado a hectárea (a nivel de rodal) es más de 4 veces superior en las más densas. En cuanto a la suma de las secciones de las ramas podadas durante el ensayo no

existe diferencias entre las densidades, o sea se obtiene la misma sección de ramas pero repartidas en distinto número de ramas. Esto indicaría que si se analizaran los costos de manejo de los restos de poda, convendría menores densidades ya que la cantidad de cortes por hectárea es la mitad respecto a las mayores densidades. Además de la mejora de forma, la poda favorece la disminución de la intercepción de la radiación la cual benefició el crecimiento lo que determina que la poda es una práctica recomendada como herramienta para aumentar la calidad de *Prosopis alba* aplicada en los primeros años.

Se ha demostrado que el crecimiento de *P. alba* hasta los 7 años de edad en plantaciones de bajas densidades de plantación (450, 560, 750 y 1000 árboles/ha.) tienen el potencial para lograr los mayores volúmenes de fuste con una menor cantidad de biomasa extraída. Al mismo tiempo, la poda permite disminuir la competencia intraespecífica, por lo cual las plantas siguen creciendo sin necesidad de raleo en comparación con plantas a la misma densidad sin poda.

De nuestros resultados podemos deducir que los criterios y frecuencia de poda empleados en este ensayo fueron adecuados y podrían ser justificados practica y económicamente para ser aplicados en plantaciones comerciales de algarrobo. De hecho las plantaciones de algarrobo en la región de estudio son manejadas por recomendaciones técnicas de la ley nacional 25.080, la cual subsidia con su mayor valor a plantaciones con una densidad mayor de 500 plt/ha. Y esto coincide con una de las densidades de mayor desempeño analizadas.

La maximización de la producción de madera depende de la gestión conjunta de los recursos del sitio y la intensidad de los tratamientos. Es necesario en un futuro incluir el raleo (su respuesta) en el modelado, dado que el raleo liberaría recursos y su efecto en *Prosopis* no está estudiado completamente.

El diagrama de manejo del rodal realizado para algarrobo blanco para la zona de

riego de Santiago del Estero es particularmente útil para planificar y evaluar las consecuencias de regímenes de manejo silvícola alternativo. Este diagrama ayudará a los gestores de dichas masas a determinar y evaluar el manejo de la densidad de masa para una gran variedad de objetivos. Asimismo, sienta las bases para incorporar la estimación de otros productos de valor, como frutos o biomasa a partir de ramas, las que podrán incorporarse al modelo planteado. A futuro se recomienda agregar el desempeño de otras plantaciones realizadas con la misma especie pero bajo condiciones ambientales distintas en función de su densidad para aumentar la precisión del modelo.

7- Bibliografía

- Alvarez, J. A., P. E. Villagra, R. Villalba, and G. Debandi. 2013a. Effects of the pruning intensity and tree size on multi-stemmed *Prosopis flexuosa* trees in the Central Monte, Argentina. *Forest Ecology and Management* 310:857–864.
- Alvarez, J. A., P. E. Villagra, R. Villalba, and G. Debandi. 2013b. Effects of the pruning intensity and tree size on multi-stemmed *Prosopis flexuosa* trees in the Central Monte, Argentina. *Forest Ecology and Management* 310:857–864.
- Andenmatten, E., and F. Letourneau. 1998. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) (Mirb.) Franco de aplicación en la región andino patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 103:69–75.
- Andenmatten, E., and F. Letourneau. 2004. Piltriquitron v1.0 Modelo de Simulación de crecimiento de Pino oregón y ponderosa en el Noroeste de la Patagonia.
- Angueira, C., and D. Prieto. 2007. SigSE versión 2.0 (Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Santiago del Estero.
- Ansley, R. J., D. L. Price, S. L. Dowhower, and D. H. Carlson. 1992. Seasonal Trends in Leaf-Area of Honey Mesquite Trees - Determination Using Image-Analysis. *Journal of Range Management* 45:339–344.
- Ansley, R. J., and B. A. Trevino. 1998. Intraspecific competition whole plant responses in honey mesquite : Leaf and. October 51.

- Asner, G. P., C. A. Wessman, and S. Archer. 1998. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications* 8:1003–1021.
- Atanasio, M. 2014. Influencia de la poda en el crecimiento de *Prosopis alba* Griseb. Influence of pruning on growth of *Prosopis alba* Griseb. *Revista quebracho* 1,2:66–78.
- Auchmoody, L. R. 1972. Epicormic branching: Seasonal change, influence of fertilization, and frequency of occurrence in uncut stands. *Res. Pap.*:8 p.
- Bardon, C., L. Lusignan, B. Herault, and E. Nicolini. 2010. Epicormic branches are indicative of slow radial growth in *Eperua falcata* Aublet (*Caesalpiniaceae*), a canopy tree of French Guiana .:1–10.
- Bégin, C., and L. Filion. 1999. Black spruce (*Picea marianna*) architecture. *Canadian Journal of Botany* 77:664–672.
- Blum, B. 1963. Excessive exposure stimulates epicormic branching in young northern hardwoods.
- Bowersox, T. W., and W. W. Ward. 1968. Auxin Inhibition of Epicormic Shoots in White Oak. *Forest Science* 14:192–195.
- Bravo, F., G. Montero, and M. Del Río. 1997. Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología* 11:177–187.
- Büsgen, M., & Münch, E. 1929. *The Structure And Life Of Forest Trees*. Chapman And Hall Limited, New York.
- Cabrero Ortega, Y., and A. García Pérez. 2015. Análisis estadístico de datos espaciales con QGIS y R. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Carpineti, L. A., D. T. Fernando;, J. E. Glade, M. A. MARCO, M. Aguerre, and G. Denegri. 1995. Manual para productores de eucaliptos de la mesopotamia argentina. Page Inta.
- Cetina-Alcalá, V., M. Ortega-Delgado, V. González-Hernández, J. Vargas-Hernández, M. Colinas-León, and A. Villegas-Monter. 2001. Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia* 35:599–607.
- Chauchard, L., M. C. Frugoni, and C. Nowak. 2015. Buenas prácticas para el manejo de plantaciones forestales en el noroeste de la Patagonia.
- Chauchard, L., R. Sbrancia, M. Gonzalez, L. Maresca, and A. Rabino. 1999. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$

- o ley del autorraleo. *Bosque (Valdivia)* 20:79–94.
- Collier, R. L., and E. C. Turnblom. 2001. Epicormic Branching on Pruned Coastal. *Western Journal of Applied Forestry* 16:80–86.
- Coronel de Renolfi, M., G. Cardona, J. G. Moglia, and A. T. Gómez. 2014. Productividad y costos del raleo de algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Santiago del Estero, Argentina. Una primera aproximación. *Agrociencia Uruguay* 18:128–136.
- Costas, R., S. Korth, S. Figueredo, E. Weber, P. Mac Donagh, A. Friedl, J. Heck, and M. Alves do Porto. 2007. Sistemas de ecuaciones de producción y crecimiento de *Pinus taeda* L. con variables asociadas a las podas. System of equations for yield and growth of *Pinus taeda* including prune variables 16:136–144.
- Dale, M., and D. Sonderman. 1984. Effect of thinning on growth and potential quality of young white oak crop trees. *United States Department of Agriculture: Forest Service: Northeastern Forest Experiment Station: Research Paper NE-539:1–31.*
- Della-Bianca, L. 1972. Notes: Screening Some Stand Variables for Post-Thinning Effect on Epicormic Sprouting in Even-Aged Yellow-Poplar. *For. Sci.:*155–158.
- Duff, A. B., J. M. Meyer, C. Pollock, and P. Felker. 1994. Biomass production and diameter growth of nine half-sib families of mesquite (*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*) and a fast growing *Prosopis alba* half-sib family grown in Texas. *Forest Ecology and Management* 67:257–266.
- Dzikiti, S., K. Schachtschneider, V. Naiken, M. Gush, G. Moses, and D. C. Le Maitre. 2013. Water relations and the effects of clearing invasive *Prosopis* trees on groundwater in an arid environment in the Northern Cape, South Africa. *Journal of Arid Environments* 90:103–113.
- Eastham, J., C. W. Rose, D. A. Charles-Edwards, D. M. Cameron, and S. J. Rance. 1990. Planting density effects on water use efficiency of trees and pasture in an agroforestry experiment.
- Eckstein, E. 1974. Dangers to success in pruning Douglas-fir. *Allgemeine Forstzeitschrift* 29:1032–1034.
- Espinosa, M. B., J. S. Garcia, and O. E. Valeia. 1994. Efecto de intensidades diferentes de raleo en el crecimiento de un rodal de pino radiata. *Bosque* 15:55–65.
- Ewens, M., L. Claps, M. Navall, P. Zamudio, L. Guardia, and A. Rojas. 2005. Técnicas silviculturales aplicadas al incremento del rendimiento de madera aserrable en plantaciones de algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.) del Chaco Semiárido Argentino. *Page Jornadas de Ciencia y Técnica 2005 de la Universidad Católica de*

Santiago del Estero.

- Felker, P., and R. S. Bandurski. 1979. Uses and potential uses of leguminous trees for minimal energy input agriculture. *Economic Botany* 33:172–184.
- Felker, P., P. R. Clark, J. F. Osborn, and G. H. Cannell. 1984. *Prosopis* pod production—Comparison of North American, South American, Hawaiian, and African germplasm in young plantations. *Economic Botany* 38:36–51.
- Felker, P., J. M. Meyer, and S. J. Gronski. 1990. Application of self-thinning in mesquite (*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*) to range management and lumber production. *Forest Ecology and Management* 31:225–232.
- Fernández Tschieder, E. 2011. ¿Por qué cae la productividad de los rodales forestales? Influencia de la dominancia de crecimiento del rodal y la eficiencia de crecimiento individual.
- Fleming, P. M., A. Celso, D. Antonino, R. M. Pimentel, C. Alberto, B. D. O. Lira, G. D. Alves, J. Joaquim, and P. Cabral. 2003. no Semi-Árido Nordeste 8:25–30.
- Foroughbakhch, R., G. Reyes, M. A. Alvarado-va, A. Rocha-estrada, and J. Herna. 2005. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern Mexico. *Evaluation* 216:359–366.
- Galiński, W., J. Witowski, and M. Zwieniecki. 1994. Non-random height pattern formation in even aged scots pine (*Pinus sylvestris* L.) nelder plots as affected by spacing and site quality. *Forestry* 67:49–61.
- Gimenes, A. M., N. Ríos, P. Hernández, and J. G. Moglia. 2009. Influencia de la edad en el crecimiento de vinal (*Prosopis ruscifolia* Burkart.), en la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Page Madera y bosques. Instituto de Ecología*.
- Gimenez, A. M., N. Rios, G. Moglia, and C. Lopez. 1998. Leño y corteza de *Prosopis alba* Griseb., algarrobo blanco, Mimosaceae, en relación con algunas magnitudes dendrométricas. *BOSQUE* 19:53–62.
- Gower, S. T., R. E. Mcmurtrie, D. Murty, and R. Mcmurtrie. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends in Ecology & Evolution* 11:378–382.
- Guzman, A., M. Coronel de Renolfi, and M. G. Pece. 2011. Determinación de fallas en la siembra comercial de Algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en un vivero de Santiago del Estero. *Revista Quebracho* 19:46–53.
- Gyenge, J. E., M. E. Fernández, and T. M. Schlichter. 2009. Effect of pruning on branch production and water relations in widely spaced ponderosa pines. *Agroforestry*

Systems 77:223–235.

- Gyenge, J., M. E. Fernández, and S. Varela. 2012. Short- and long-term responses to seasonal drought in ponderosa pines growing at different plantation densities in Patagonia, South America. *Trees - Structure and Function* 26:1905–1917.
- Hawley, R., and D. Smith. 1972. *Silvicultura práctica*. Page (Omega S.A., Ed.). Baelona.
- Heitschmidt, R. K., R. J. Ansley, S. L. Dowhower, P. W. Jacoby, and D. L. Price. 1988. Some observations from the excavation of honey mesquite root systems. *Journal of Range Management* 41:227–231.
- Hennessey, T. C., P. M. Dougherty, T. B. Lynch, R. F. Wittwer, and E. M. Lorenzi. 2004. Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. Pages 97–116 *Forest Ecology and Management*.
- Ishii, H., and E. D. Ford. 2001. The role of epicormic shoot production in maintaining foliage in old *Pseudotsuga menziesii* (Douglas-fir) trees. *Canadian Journal of Botany* 79:251–264.
- Ishii, H., E. D. Ford, and C. E. Dinnie. 2002. The role of epicormic shoot production in maintaining foliage in old *Pseudotsuga menziesii* (Douglas-fir) trees II. Basal reiteration from older branch axes. *Canadian Journal of Botany* 80:916–926.
- Juarez de Galindez, M., A. M. Giménez, N. Rios, and M. Balzarini. 2005. Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb . empleando dos modelos biológicos. *Quebracho* 14:34–42.
- Juodvalkis, A., L. Kairiukstis, and R. Vasiliauskas. 2005. Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. *European Journal of Forest Research* 124:187–192.
- Kees, M. S., and F. J. Michela. 2015. Recomendaciones prácticas de poda y raleo con diferentes horizontes de planificación en la provincia del Chaco. Informe Técnico INTA. Ministerios de Agroindustrias de la Nación:21.
- Kerr, G., and R. Harmer. 2001. Production of epicormic shoots on oak (*Quercus robur*): Effects of frequency and time of pruning. *Forestry* 74:467–477.
- Knowe, S. A., and D. E. Hibbs. 1996. Stand structure and dynamics of young red alder as affected by planting density. *Forest Ecology and Management* 82:69–85.
- Ledesma, T., G. De Bedia, and C. López. 2008. Productividad de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero. *Revista Quebracho* 15:5–9.
- Lemoine, B. 1980. Densité de peuplement, concurrence et coopération chez le pin

- maritime. II.- Résultats à 5 et 10 ans d'une plantation à espacement variable. *Annales des Sciences Forestières*:217–237.
- Long, J. N. 1985. A practical approach to density management. *The Forestry Chronicle* 61:23–27.
- Long, J. N., T. J. Dean, and S. D. Roberts. 2004. Linkages between silviculture and ecology: Examination of several important conceptual models. *Forest Ecology and Management* 200:249–261.
- Maghembe, J. A., E. M. Kariuki, and R. D. Haller. 1983. Biomass and nutrient accumulation in young *Prosopis juliflora* at Mombasa, Kenya. *Agroforestry Systems* 1:313–321.
- Maldonado, M. A. 2007. Manejo de vinalares. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Marmillon, E. 1986. Management of algarrobo (*Prosopis alba*, *P. chilensis*, *P. flexuosa*, and *P. nigra*) in the semiarid regions of Argentina. *Forest Ecology and Management* 16:33–40.
- Maurin, V., and A. DesRochers. 2013. Physiological and growth responses to pruning season and intensity of hybrid poplar. *Forest Ecology and Management* 304:399–406.
- Medhurst, J. L., and C. L. Beadle. 2001. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. *Tree physiology* 21:989–999.
- Meier, A. R., M. R. Saunders, and C. H. Michler. 2012. Epicormic buds in trees: A review of bud establishment, development and dormancy release. *Tree Physiology* 32:565–584.
- Miller, G. W., and J. W. Stringer. 2004. Effect of Crown Release on Tree Grade and DBH Growth of White Oak Sawtimber in Eastern Kentucky. In *Proceedings of the 14th Central Hardwood Forest Conference*. Eds. D.A. Yaussy, D.M. Hix, R.P. Long and P.C. Goebel. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep.:37–44.
- Ministerio de Agroindustria, S. de D. F. I. P. de la N. 2015. NEA Corrientes Forestal: Información técnica. <http://neacorrientesforestal.blogspot.com.ar/p/informacion-tecnica.html>.
- Moglia, J. G., and A. M. Gimenez. 2006. Análisis de la Arquitectura Vegetal: Resultados preliminares de la Arquitectura vegetal de *Prosopis alba* y *Prosopis nigra*. Trabajo presentado en las Segundas Jornadas Forestales de Santiago del Estero. Page

Segundas Jornadas Forestales de Santiago del Estero.

- Monserud, R. A., T. Ledermann, and H. Sterba. 2005. Are self-thinning constraints needed in a tree-specific mortality model? *Forest Science*. 50(6): 848-858 50:848–858.
- Montagu, K. D., and D. E. Kearney. 2003. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review. *Science* 179:1–13.
- Munka, C., F. Pezzani, and M. Caffera. 2013. Efecto del manejo silvicultural sobre el área foliar y la evapotranspiración en *Pinus taeda* en el noreste de Uruguay. *Agrociencia* 17:55–63.
- Muñoz, F., A. Neira, and J. Cancino. 2010. Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (deane & maiden) maiden. *Revista interciencia* 35.
- Muñoz, F., R. Rubilar, M. Espinosa, J. Cancino, J. Toro, and M. Herrera. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management* 255:365–373.
- Nelder, J. 1962. New kinds of systematic designs for spacing experiments.
- Newton, P. F., Y. Lei, and S. Y. Zhang. 2005. Stand-level diameter distribution yield model for black spruce plantations. *Forest Ecology and Management* 209:181–192.
- Nicolini, E., Y. Caraglio, R. Pelissier, C. Leroy, and J.-C. Roggy. 2003. Epicormic Branches: a Growth Indicator for the Tropical Forest Tree, *Dicorynia guianensis* Amshoff (Caesalpinaceae). *Annals of Botany* 92:97–105.
- Nicolini, E., B. Chanson, and F. Bonne. 2001. Stem Growth and Epicormic Branch Formation in Understorey Beech Trees (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Botany* 87:737–750.
- Nowak, C. 2002. Stocking charts as a way to organize stand complexity. *The New York Forester* 4:5–6.
- O'Hara, K. L., and N. I. Valappil. 2000. Epicormic sprouting of pruned western larch. *Canadian Journal of Forest Research* 30:324–328.
- O'Hara, K. L., R. A. York, and R. C. Heald. 2008. Effect of pruning severity and timing of treatment on epicormic sprout development in giant sequoia. *Forestry* 81:103–110.
- Otoda, T., and H. Ishii. 2009. Basal reiteration improves the hydraulic functional status of mature *Cinnamomum camphora* trees. *Trees - Structure and Function* 23:317–323.
- Pallardy, S. G., and T. T. Kozlowski. 2008. *Physiology of woody plants*. Elsevier.
- Parrott, D. L., J. S. Brinks, and J. M. Lhotka. 2012. Designing Nelder wheel plots for tree

- density experiments. *New Forests* 43:245–254.
- Pasiecznik, N., P. Felker, P. Harris, L. N. Harsh, G. Cruz, J. Tewari, K. Cadoret, and L. J. Maldonado. 2001. *The Prosopis Juliflora-Prosopis Pallida Complex: A Monograph*. Page HDRA, Coventry, UK.
- Pastur, G., J. M. Cellini, M. V. Lencinas, R. Vukasovic, R. Vicente, F. Bertolami, and J. Giunchi. 2001. Modificación del crecimiento y de la calidad de fustes en un raleo fuerte de un rodal en fase de crecimiento óptimo inicial de *Nothofagus pumilio*. *Ecología austral* 11:95–104.
- Patch, N. L., and P. Felker. 1997a. Influence of silvicultural treatments on growth of mature mesquite (*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*) nine years after initiation. *Forest Ecology and Management* 94:37–46.
- Patch, N. L., and P. Felker. 1997b. Silvicultural treatments for sapling mesquite (*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*) to optimize timber production and minimize seedling encroachment. *Forest Ecology and Management* 96:231–240.
- Penner, M., D. E. Swift, R. Gagnon, and J. Brissette. 2006. A stand density management diagram for balsam fir in New Brunswick. *Forestry Chronicle* 82:700–711.
- Pinkard, E. A. 2003. Physiological and growth responses related to pattern and severity of green pruning in young *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management* 182:231–245.
- Pinkard, E. a., and C. L. Beadle. 2000. A physiological approach to pruning. *International Forestry Review* 2:295–305.
- Pinkard, E. a, M. Battaglia, and C. L. Mohammed. 2007. Defoliation and nitrogen effects on photosynthesis and growth of *Eucalyptus globulus*. *Tree physiology* 27:1053–63.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, and P. E. Real. 1997. *Mensura forestal*. Page (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit; Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- R Core Team. 2013. R: The R Project for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Rasband, W. S. 2007. ImageJ. U. S National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. - Google Académico. *Journal of agricultural research* 46:627–638.
- Repetto-Giavelli, F., L. A. Cavieres, and J. A. Simonetti. 2007. Respuestas foliares de

- Aristotelia chilensis* (Molina) stuntz (Elaeocarpaceae) a la fragmentación del bosque maulino. *Revista Chilena de Historia Natural* 80:469–477.
- Reque, J. A., and F. Bravo. 2007. Viability of thinning sessile oak stands by girdling. *Forestry* 80:193–199.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, and y C. W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011.
- Rodríguez, G. (n.d.). Introducing R. <http://data.princeton.edu/R/>.
- Rodríguez, R., M. Espinosa, P. Real, and J. Inzunza. 2002. Analysis of productivity of radiata pine plantations under different silvicultural regimes using the 3-PG process-based model. *Australian Forestry* 65:165–172.
- Rossi, F. C. 2014. Crecimiento en ejemplares juveniles de *Prosopis alba* Griseb. en plantaciones del Chaco Semiárido Argentino. Facultad de Ciencias Forestales - Universidad de Santiago del Estero.
- Senillani, M., and M. Navall. 2006. Parámetros dasométricos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb del área de riego de la Provincia de Santiago del Estero. *Jornadas Forestales de Santiago del Estero*. 2. ...:2–7.
- Sharifi, M. R., E. T. Nilsen, P. W. Rundel, A. Journal, N. M. Jun, and W. Rundel. 1982. Biomass and Net Primary Production of *Prosopis glandulosa* (Fabaceae) in the Sonoran Desert of California BIOMASS AND NET PRIMARY PRODUCTION OF PROSOPIS GLANDULOSA (FABACEAE) IN THE SONORAN DESERT OF CALIFORNIA1. *American Journal of Botany* 69:760–767.
- Smith, F. W., and S. C. Resh. 1999. Age-Related Changes in Production and Below-Ground Carbon Allocation in *Pinus Contorta* Forests. *Forest Science* 45:333–341.
- Smith, H. C. 1977. Northeastern Forest Experiment Station.
- Stein, W. I. 1955. Pruning to different heights in young Douglas-fir. *J. Forest.* 53:352–355.
- Sundberg, B., a Ericsson, C. H. Little, T. Näsholm, and R. Gref. 1993. The relationship between crown size and ring width in *Pinus sylvestris* L. stems: dependence on indole-3-acetic acid, carbohydrates and nitrogen in the cambial region. *Tree physiology* 12:347–62.
- Takiya. 2010. The effects of early and intense pruning on light penetration, tree growth, and epicormic shoot dynamics in a young hybrid lecologyarch stand. *The Japanese Forest Society and Springer* 15:149–160.
- Trimble, G. R., and D. W. Seegrst. 1973. Epicormic branching on hardwood trees

- bordering forest openings. Page Res. Pap. NE-261. Upper Darby, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Tschaplinski, T. J., and T. J. Blake. 1995. Growth and carbohydrate status of coppice shoots of hybrid poplar following shoot pruning. *Tree physiology* 15:333–8.
- Velázquez-Martí, B., E. Fernández-González, I. López-Cortés, and D. M. Salazar-Hernández. 2011. Quantification of the residual biomass obtained from pruning of vineyards in Mediterranean area. *Biomass and Bioenergy* 35:3453–3464.
- Venture, J., A. Program, L. Pinkard, and P. Sands. 2004. Silvicultural management of blackwood. Development.
- Verga, A., L. López, C. López, M. Navall, J. Joseau, C. Gómez, O. Royo, W. Degano, and M. Marcó. 2009. Caracterización morfológica de los algarrobos (*Prosopis* sp.) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. *Quebracho* 17:31–40.
- Waring, K. M., and K. L. O'Hara. 2005. Western journal of applied forestry. Page Western Journal of Applied Forestry. Society of American Foresters.
- Wignall, T. A., and G. Browning. 1988. The Effects of Stand Thinning and Artificial Shading on Epicormic Bud Emergence in Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Forestry* 61:45–59.
- Wignall, T. A., G. Browning, and K. A. D. Mackenzie. 1987. The Physiology of Epicormic Bud Emergence in Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) Responses to Partial Notch Girdling in Thinned and Unthinned Stands. *Forestry* 60:45–56.
- Zhang. 2005. A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line. *Canadian Journal Forest Research* 35:1507–1514.
- Zhang, L., Z. Hu, J. Fan, D. Zhou, and F. Tang. 2014. A meta-analysis of the canopy light extinction coefficient in terrestrial ecosystems. *Frontiers of Earth Science* 8:599–609.
- Zimmerman, M. H., and C. L. Brown. 1971. Trees: structure and function. Page Trees: structure and function. New York, USA, Springer-Verlag.