



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

**La calidad de sitio como condicionante del crecimiento
y calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb
en la provincia de Santiago del Estero, Argentina**



María Gracia Senilliani

TESIS DOCTORAL

Facultad de Ciencias Forestales

Santiago del Estero, Argentina

2021



ISBN 978-987-8922-09-6



Senilliani, María Gracia

La calidad de sitio como condicionante del crecimiento y la calidad de frutos de plantaciones de Prosopis alba Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina : Tesis doctoral : Facultad de Ciencias Forestales : Universidad Nacional de Santiago del Estero / María Gracia Senilliani. - 1a ed. - Santiago del Estero : Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE. Facultad de Ciencias Forestales, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8922-09-6

1. Algarrobo. 2. Bosques Nativos. 3. Santiago del Estero . I. Título.
CDD 581.73



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



**La calidad de sitio como condicionante del crecimiento
y la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis
alba* Griseb en la provincia de Santiago del Estero,
Argentina**

TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS FORESTALES

POR

María Gracia Senilliani

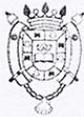
Ingeniera Forestal - Universidad Nacional de Santiago del Estero - 1997

Director de tesis: **Dr. Miguel Brassiolo**
Codirector: **Dra. Cecilia Bruno**

Santiago del Estero, Argentina.
Año 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



UNSE
Universidad Nacional
de Santiago del Estero



FCF·UNSE
DIRECCIÓN DEL PROGRAMA DE
POSGRADO

TÉRMINO DE APROBACIÓN

TESIS DOCTORAL

En la ciudad de Santiago de Estero, a los 10 días de diciembre de 2021, siendo las 10:00 horas, se reúne en forma virtual, mediante el uso de medios tecnológicos sincrónicos, el Tribunal de Tesis, constituido por los profesores: Dr. Tomaz Longhi (Universidad Federal de Paraná – UFPR), Dr. Luis Chauchard (Universidad Nacional del Comahue - UNCo) y Dr. Hugo Acosta (Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE), para evaluar la Tesis Doctoral de la Ing. María Gracia Senilliani, DNI 21.631.506, en la Defensa de Tesis Doctoral, convocada mediante Resolución CD FCF N° 365/2021.

La Tesis se titula “La calidad de sitio como condicionante del crecimiento y calidad de frutos de plantaciones de Prosopis alba Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina”, y fue dirigida por el Dr. Miguel Brassiolo (Universidad Nacional de Santiago del Estero) y codirigida por la Dra. Cecilia Bruno (Universidad Nacional de Córdoba).

Después de evaluar la Tesis e interrogar a la doctoranda, el Jurado deliberó por la APROBACIÓN, con la calificación 10 (DIEZ).

JURADO DE TESIS


Firma

Dr. Tomaz Longhi


Firma

Dr. Luis Chauchard


Firma

Dr. Hugo Acosta



Quiero dedicar estas líneas ante todo a mi familia, Gonzalo, Victoria, Simón y Juana, quienes siempre supieron dar de una forma u otra el apoyo necesario para que este proyecto emprendido tiempo atrás culmine de la mejor manera.... ¡gracias!

AGRADECIMIENTOS

Fueron muchas las personas que intervinieron en el camino transitado durante mi formación de posgrado y presentación de tesis, no quiero olvidarme de nadie...y si fuera así desde ya pido disculpas, pero tratare de hacer memoria y revivir cada etapa.

Cuando definí el tema sobre el que me interesaba trabajar en esta tesis, quien estuvo allí para decir la palabra justa y orientarme, mi Director de tesis Miguel Brassiolo, con quien a menudo disentimos en diversos temas (¡ja, ja!) pero en este caso hicimos un buen equipo. Así es que comencé con la realización de diversos cursos, en uno de ellos conocí a la que fuera mi Co-directora de tesis Cecilia Bruno, en ese curso aprendí mucho de lo que a posteriori pude aplicar en el análisis estadístico de mis datos, sumado a que había encontrado la co-directora perfecta para seguir aprendiendo en esa área del conocimiento que considere compleja hasta ese momento.

En el trabajo a campo, fueron muchos colegas y estudiantes los que participaron realizando las mediciones año tras año, Pablo, Analía, Rita, Cinthya, Marcelo, Fanny, Lepi, gracias a ellos.

En la etapa de escritura del documento, recibí importantes aportes del equipo cátedra de Silvicultura, como siempre Magui, Analía, Fede, Pablo, Mati y Miguel fueron jurados haciendo aportes para mejorar el trabajo de un compañero, tarea que hacíamos a menudo con cada doctorando de la cátedra. Igualmente colegas de la Universidad politécnica de Madrid, los profesores Dres. Juan Oliet y Sonia Roig supieron escucharme y hacer aportes al trabajo realizado hasta el momento; así mismo debo reconocer los importantes aportes de los profesores Dres. Iván Crespo Silva, Graciela Bolsón y Julio Arce profesores colegas de la Universidad Federal de Paraná en Curitiba.

Gracias al Posgrado de la Facultad de Ciencias Forestales UNSE, por permitir el acceso a becas que posibilitaron la realización de diferentes etapas de esta investigación.

Hasta aquí he nombrado a aquellas personas que aportaron a mi trabajo desde lo académico, pero una tesis no solo tiene condimentos académicos sino también emocionales y es allí donde quiero resaltar el apoyo incondicional de mi familia a quienes amo, mi esposo Gonzalo que supo cumplir y reemplazarme en muchas de las tareas mientras yo dedicaba tiempo a este proyecto, a mis hijos Viki y Simón que desde su óptica adolescente veían a su mama hacer algo...llamado tesis...y se preguntaban para qué sirve? después fueron comprendiendo... y mi madre que aunque no pudo estar en el momento de la defensa...me

acompañó a la distancia emocionándose cuando la llame para contarle que había dado el paso final. Gracias a mis amigas, Dory y Vani que siempre me incentivaron a que siga y concluya este proyecto.

Gracias a todos, porque fue un proyecto de todo un equipo que colaboró para cumplir con el objetivo final, la tesis.

INDICE GENERAL

| Capítulo | página |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCION..... | 1 |
| 1.1 Objetivo general..... | 5 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 2. REVISION BIBLIOGRAFICA..... | 6 |
| 2.1 Origen, distribución e importancia del género Prosopis..... | 6 |
| 2.2 Geomorfología de los suelos en las áreas de estudio..... | 8 |
| 2.3 Calidad de sitio..... | 8 |
| 2.3.1 Índice de Sitio..... | 9 |
| 2.3.2 Curvas de crecimiento en altura dominante y el índice de sitio..... | 11 |
| 2.3.3 Índice de Sitio en relación al ambiente..... | 12 |
| 2.4 Calidad de frutos..... | 14 |
| 2.5 Crecimiento y producción..... | 15 |
| 2.6 Modelos de crecimiento clásicos y modelos contemporáneos mixtos..... | 18 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 20 |
| 3.1 Área de estudio..... | 20 |
| 3.1.1 Ubicación geográfica..... | 20 |
| 3.1.2 Características ambientales..... | 21 |
| 3.1.3 Caracterización socioeconómica..... | 22 |
| 3.1.4 Áreas de plantaciones con Prosopis alba en estudio en la provincia..... | 23 |
| 3.2 Metodología..... | 25 |
| 3.2.1 Selección de sitios y registro de datos..... | 25 |
| 3.2.2 Variables registradas..... | 28 |
| 3.2.3 Estimación de los Modelos de Índice de sitio..... | 31 |
| 3.2.4 Análisis de la relación entre la calidad de vainas con la calidad del sitio..... | 35 |
| 3.2.5 Crecimiento y producción..... | 36 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 40 |
| 4.1 Índice de sitio..... | 40 |
| 4.1.1 Determinación del criterio de altura dominante..... | 40 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.1.2 | Altura dominante..... | 41 |
| 4.1.3 | Modelación de las curvas de crecimiento en altura dominante y determinación del Índice de sitio..... | 42 |
| 4.2 | Clases de calidad de sitio en relación a factores edafoclimático..... | 55 |
| 4.2.1 | Clases de calidad por parcela..... | 55 |
| 4.2.2 | Factores climáticos..... | 55 |
| 4.2.3 | Factores fisiográficos..... | 58 |
| 4.2.4 | Propiedades Físicas y Químicas..... | 59 |
| 4.2.5 | Relación crecimiento-suelo..... | 69 |
| 4.2.6 | Umbral salino..... | 71 |
| 4.2.7 | Modelos de predicción del Índice de Sitio..... | 72 |
| 4.2.8 | Impacto del sitio en el crecimiento..... | 77 |
| 4.3 | Calidad de frutos en relación al sitio..... | 80 |
| 4.3.1 | Análisis proximal en vainas..... | 80 |
| 4.4 | Crecimiento y producción..... | 86 |
| 4.4.1 | Crecimiento de árbol individual..... | 86 |
| 4.4.1.1 | <i>Diámetro</i> | 86 |
| 4.4.1.2 | <i>Altura</i> | 93 |
| 4.4.1.3 | <i>Volumen de fuste</i> | 94 |
| 4.4.1.4 | <i>Modelo de estimación del IMA e ICA en volumen de fuste del árbol</i> | 98 |
| 4.4.2 | Crecimiento de rodales..... | 101 |
| 4.4.2.1 | <i>Diámetro, área basal</i> | 101 |
| 4.4.2.2 | <i>Altura total</i> | 103 |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 107 |
| 6. | RECOMENDACIONES..... | 109 |
| 7. | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 111 |

INDICE DE TABLAS

| Tabla | página |
|--|--------|
| 1. Descripción de los sitios de muestreo según el departamento de la provincia de Santiago del Estero, las superficie y edad del rodal en la última medición, espaciamiento, caracterización del tipo de parcela, cantidad de parcelas medidas y número de mediciones realizadas | 26 |
| 2. Modelos ajustados y sus funciones para describir el crecimiento en altura dominante en función a la edad. | 32 |
| 3. Codificación de variables fisiográficas y edáficas..... | 34 |
| 4. Comparación de la altura dominante mediante dos criterios: altura de Assman, (media de los 100 árboles más gruesos por hectárea) y altura dominante de todos los árboles mayores que el diámetro medio sumado dos desviaciones estándar ($dm + 2\sigma$)..... | 40 |
| 5. Altura dominante promedio (Hd) y variabilidad en relación a la edad de los rodales (DE, mínimo y máximo), definida por rangos de edades tempranas (de 1 a 7,9 años), edades medias (de 8 a 15 años) y edades avanzadas (más de 15 años)..... | 41 |
| 6. Parámetros estimados y sus errores estándar para cada uno de los 9 modelos ajustados de curva de crecimiento en altura dominante en función de la edad de los árboles de algarrobo en la región chaqueña semiárida..... | 46 |
| 7. Criterios de bondad de ajuste de los modelos lineal y no lineal de efectos fijos | 47 |
| 8. Criterios de bondad de ajuste de los modelos no lineales mixtos..... | 47 |
| 9. Análisis de la varianza para las variables Índice de Sitio (IS) y Altura Dominante (Hd) según clases de calidad | 55 |
| 10. Valores promedios de temperatura, precipitación y relación de evapotranspiración potencial de las estaciones meteorológicas en el área de estudio..... | 56 |
| 11. Matriz de correlación de Pearson con 11 variables seleccionadas: CE en horizonte A, porosidad total en horizonte AC, pH en horizonte C1, textura (Text), concentración de | |

| | |
|--|----|
| Na, Ca y Mg, RAS en horizonte A, permeabilidad (Pe), drenaje (D), relieve (Rel) y carbonatos (Carb)..... | 68 |
| 12. Valores promedios y desviación estándar (DE) para variables dasométricas, propiedades químicas y físicas del suelo por clase de calidad de sitio en rodales con edades de 15 a 16 años..... | 69 |
| 13. Valores umbrales por clase de calidad de sitio para las variables edáficas químicas, concentración de sodio (Na ⁺) en horizonte A (meq/l), conductividad eléctrica (CE) del Horizonte AC (dSm ⁻¹), pH y RAS en rodales de 15 a 16 años..... | 71 |
| 14. Los coeficientes de regresión y estadísticos..... | 73 |
| 15. Los coeficientes de regresión y estadísticos..... | 75 |
| 16. Parámetros que miden la precisión y la variabilidad de la estimación del modelo, el error cuadrático medio de predicción (ECMP) y el coeficiente de variación (CV)..... | 76 |
| 17. Valores promedios (%), desviación estándar (D.E) y valores máximos y mínimos de cada parámetro del análisis químico de vainas en plantaciones del área de riego de la provincia | 80 |
| 18. Análisis de la varianza (Wilks) y prueba de Hotelling, muestran diferencias entre clases de calidad de sitio..... | 82 |
| 19. Medias ajustadas a través de un análisis de la varianza multivariado para comparar la edad de cosecha de los rodales con la calidad de vainas..... | 83 |
| 20. Medias ajustadas a través de un análisis de la varianza multivariado para comparar las densidades de los rodales con la calidad de vainas..... | 84 |
| 21. Estadística descriptiva por árbol a partir de las series de incremento radial para el incremento anual en diámetro (ICA), DAP, volumen de fuste (VF), altura total (HT) y calidad de sitio | 86 |
| 22. Valores promedio para las variables DAP, ICA e IMA en diámetro por densidad de plantación y clase de sitio a los 11 años..... | 89 |
| 23. Valores promedio para el crecimiento en volumen de fuste (ICA) por densidad de plantación y clase de sitio a los 11 años. | 95 |

- 24.** Crecimiento en volumen (m³/ha/año) por clase de sitio y densidad de plantación considerando la edad de 11 años.....97
- 25.** Parámetros estimados y sus errores estándar para cada uno de los modelos ajustados para curvas de crecimiento en DAP y volumen (modelo 1 para DAP, modelo 2 para ICA en volumen y modelo 3 para ICA en volumen) en función de la edad de árboles de algarrobo en la región chaqueña semiárida.....98
- 26.** Criterios de bondad de ajuste de los modelos (modelo 1 para DAP, modelo 2 para ICA en volumen y modelo 3 para ICA en volumen).....99
- 27.** Parámetros que miden la precisión y el sesgo en la aplicación de la ecuación generalizada HT-DAP a partir del la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la diferencia agregada (DIFA).....106

INDICE DE FIGURAS

| Figura | página |
|--|--------|
| 1. Mapa de la provincia de Santiago del Estero, localizado en la Ecorregión del Chaco Seco, República Argentina. Fuente: la autora, en base a Morello et. al., (2012) y Unidad Ejecutora del servicio de riego del río Dulce (2017)..... | 21 |
| 2. Mapa de los sitios de estudio que muestra la variación de los suelos de la región y la distribución de los puntos de muestreo. Fuente: Suelos de la República Argentina 1:500.000 y 1:1.000.000 GeoINTA. | 23 |
| 3. Imagen satelital de una plantación del área de estudio ubicada sobre diferentes elementos geomorfológicos en el área de riego de la provincia de Santiago del Estero..... | 24 |
| 4. Imagen satelital de una plantación del área de estudio ubicada en una área levemente más alta (punto C3) con mejor crecimiento que el resto de la superficie plantada ubicada en áreas deprimidas del paisaje..... | 25 |
| 5. Muestra de una sección transversal correspondiente a 1,3 metros de altura (izquierda) y la misma muestra (derecha) con anillos marcados..... | 27 |
| 6. Series de datos de altura dominante-edad de árboles provenientes de parcelas temporales (puntos), parcelas permanentes y de intervalo (línea entrecortada) y análisis de fuste (línea continua)..... | 41 |
| 7. A) Curvas de crecimiento medido a través de la altura dominante (Hd) en función de la edad, contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes, de intervalo, datos de parcelas temporales y análisis de fuste. Modelo lineal polinómico y modelos no lineales clásicos..... | 43 |
| B) Curvas de crecimiento medido a través de la altura dominante (Hd) en función de la edad, contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes, de intervalo, datos de parcelas temporales y análisis de fuste. Modelos no lineales mixtos..... | 44 |
| 8. Residuos estudentizados vs. predichos (arriba) modelos no lineales clásicos: Modelo Gompertz (A), Modelo Logístico (B), Modelo Chapman-R (C), Modelo monomolecular (D) y (abajo) modelos no lineales mixtos con corrección por correlación y heterocedasticidad | |

| | |
|--|----|
| : Modelo Gompertz (E), Modelo Logístico (F), Modelo Chapman (G) y Modelo monomolecular (H)..... | 48 |
| 9. Determinación de la curva guía. La curva de crecimiento fue contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes y de intervalo (línea entrecortada), análisis de fustes (línea continua) y datos de parcelas temporales (puntos)..... | 49 |
| 10. Curva armonizada con una función Gompertz y sus bandas de confianza (celeste oscura) y bandas de predicción (celeste claro)..... | 50 |
| 11. Familia de curvas anamórficas (líneas continuas) con la delimitación de los rangos de Hd (líneas entrecortadas) para cada clase de sitio que ha sido indicada con números romanos. Se muestra cada IS a la edad base de 15 años..... | 51 |
| 12. Familia de curvas anamórficas contrastadas con los arboles correspondientes a cada clase. En a) a la clase I, en b) a la clase II y en c) a la clase III..... | 52 |
| 13. Error de estimación del modelo de predicción de IS para cada clase de calidad en función de la edad..... | 53 |
| 14. Precipitación promedio anual (mm) en el periodo de 1961-2010..... | 55 |
| 15. Variabilidad anual de la Precipitación y Humedad relativa promedio mensual, temperatura máxima absoluta en el periodo 1991-2010..... | 55 |
| 16. Gráfico biplot de Correspondencias Múltiples y asociación de variables fisiográficas (Relieve plano alto, medio y plano bajo; Permeabilidad moderada y rápida; Drenaje regular y bueno) con las clases de calidad de sitio (CI: Clase I, C II: Clase II y C III: Clase III) | 57 |
| 17. Gráfico biplot de Correspondencias Múltiples y la asociación de variables edáficas físicas (textura franco limoso arenoso y franco limoso; Humedad uniformemente húmedo, uniformemente seco, uniformemente fresco y no uniformemente fresco) con las clases de calidad de sitio (CI: Clase I, C II: Clase II y C III: Clase III)..... | 58 |
| 18. Biplot de un Análisis de Componentes Principales para las variables físicas, porosidad total (PT) y densidad aparente (DA) en diferentes horizontes del perfil, en relación a las clases de calidad de sitio..... | 59 |
| 19. Relación del Índice de sitio con la permeabilidad (arriba izquierda), el drenaje (arriba derecha), la humedad del perfil del suelo (centro derecha), la textura (centro izquierda), porosidad total (abajo izquierda) en los suelos de los rodales..... | 60 |

| | |
|--|----|
| 20. Variación de las propiedades químicas CE, pH, [Ca+Mg] y [Na], en la profundidad del perfil y para cada clase de sitio (CI, C II y C III)..... | 61 |
| 21. Biplot de un Análisis de Componentes Principales para las variables químicas, pH, Cationes solubles (Ca +Mg, Na), Conductividad eléctrica (CE) y RAS en diferentes horizontes del perfil, en relación a las clases de calidad de sitio (I, II y III)..... | 62 |
| 22. Relación del Índice de Sitio con el contenido de carbonatos en el perfil, pH, CE, cationes solubles y RAS en suelos de los rodales..... | 64 |
| 23. variabilidad de los residuos vs predichos y grafico Q-Qplot que determina la normalidad de las observaciones en el modelo 1..... | 70 |
| 24. Residuos parciales para cada una de las variables regresoras en relación al IS..... | 71 |
| 25. A) y B) Variabilidad de los residuos vs predichos y grafico Q-Qplot que determina la normalidad de las observaciones del modelo 2..... | 72 |
| 26. Rodal de <i>Prosopis alba</i> de crecimiento regular y calicata para la descripción del perfil en el área de crecimiento..... | 74 |
| 27. Rodal de <i>Prosopis alba</i> de regular crecimiento y calicata para la descripción del perfil en el área de crecimiento..... | 74 |
| 28. Rodal de <i>Prosopis alba</i> de en sitio de mala calidad con alto grado de salinidad y perfil edáfico en el area de crecimiento | 75 |
| 29. Rodal de <i>Prosopis alba</i> en sitio de buena calidad con bajo grado de salinidad y perfil edáfico en el área de crecimiento..... | 75 |
| 30. Dendrograma con la evaluación de calidad nutritiva de frutos a partir de los parámetros Humedad, Cenizas, Lípidos, Proteínas, FDT y Carbohidratos por clase de calidad de sitio..... | 78 |
| 31. Incremento acumulado (cm) en relación a la edad del árbol, obtenido a partir del análisis epidométrico de 13 árboles seleccionados en los sitios de estudio..... | 83 |
| 32. Crecimiento en diámetro en cada clase de calidad de sitio..... | 83 |
| 33. Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio I..... | 85 |
| 34. Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio II en rodales de diferentes densidades, 250pl/ha (izquierda) y 625 pl/ha (derecha)..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| 35. Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio III..... | 87 |
| 36. Incremento anual en diámetro para cada calidad de sitio, donde se señala la edad del ICA máximo con línea vertical. | 88 |
| 37. A) Curva de altura total (m) en función de la edad de los individuos y B) en función del DAP..... | 89 |
| 38. Incremento acumulado IA (m ³) en relación a la edad obtenido a partir del análisis epidemico en 13 individuos..... | 90 |
| 39. ICA en volumen (m ³) en relación a la edad para arboles por clase de sitio y densidad inicial en el rodal. Curvas correspondientes a los arboles de clase II con densidad de 250 pla/ha (línea entrecortada), arboles de clase I con densidad 625 pl/ha (línea solida), arboles de Clase II con densidad 625 pl/ha (línea entrecortada y punto) y arboles de clase III con densidad de 625 pl/ha (puntos)..... | 91 |
| 40. Incremento acumulado en volumen para cada clase de sitio y densidad de plantación, tomando de referencia la edad 8 señalada con una línea en la abscisa..... | 92 |
| 41. Variación del IMA en volumen en relación a la edad por clase de sitio y densidad..... | 93 |
| 42. Proyección del DAP, ICA e IMA en volumen indicando mediante las líneas de referencia verticales, el máximo de productividad biológica para algarrobo blanco a los 34 años, un turno tecnológico a los 30 años y la línea de referencia horizontal que indica un DAP de 30cm..... | 96 |
| 43. Crecimiento en diámetro a la altura de pecho (DAP), diámetro cuadrático (Dg) y Área basal (AB) de los rodales en relación a la edad. Se marcan dos líneas de referencia a los 12 y 16 años aproximadamente..... | 97 |
| 44. Relación de crecimiento entre la altura total (m) y el DAP (mm) en rodales. a) Curva general de dispersión de datos b) curvas de HT-DAP por edad de la parcela | 98 |
| 45. Residuos estudentizados vs. predichos y grafico Q-Q plot para A) modelo lineal clásico y B) modelo mixto de la ecuación generalizada de HT-DAP para <i>Prosopis alba</i> | 100 |

DECLARACION

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución”.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'MG Senilliani', with a horizontal line underneath.

María Gracia Senilliani

ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| FAO | Food and Agriculture Organization |
| SAyDS | Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable |
| MAGyP: | Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca |
| CIEFAP | Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico |
| REDAF | Red Agroforestal Chaco Argentina |
| INSIMA | Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques |

La calidad de sitio como condicionante del crecimiento y la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

RESUMEN

La Silvicultura ha evolucionado hacia esquemas más precisos a nivel de rodal para lo cual las variables del sitio cumplen un rol fundamental. Este nuevo enfoque silvícola requiere de una base amplia de conocimientos que permitan entender la dinámica y productividad de la especie. El objetivo del trabajo fue determinar la influencia del sitio en el crecimiento y la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina, como un aporte de nuevos conocimientos que sustenten la toma de decisiones silviculturales. La zona de trabajo está comprendida dentro del área de riego del río Dulce en la provincia de Santiago del Estero. La base de datos proviene de parcelas temporales, de intervalo, permanentes y datos de crecimiento del análisis de fustes de árboles dominantes extraídos de plantaciones. En cada parcela se realizó un relevamiento general del sitio y se caracterizó el perfil del suelo en calicatas. Para ello se evaluaron variables edáficas y fisiográficas. Se ensayaron distintos modelos de crecimientos para caracterizar la evolución de la altura dominante. Los resultados preliminares indican que la estimación de la capacidad productiva de los sitios para *Prosopis alba* Griseb se puede expresar a partir de la familia de curvas anamórficas. El patrón de evolución en altura se ajustó con el modelo Gompertz siendo los modelos no lineales mixtos los que han tenido mejores ajustes. Con este modelo se establecieron tres calidades de sitio para la especie: I (buena), II (regular) y III (mala). La calidad de sitio en relación a factores edáficos, demuestra que el crecimiento se ve condicionado negativamente por encima de un umbral salino alterando la productividad. Resultados preliminares en la calidad nutritiva de las vainas de *Prosopis alba* en relación a la calidad de sitio indican una variación influenciada por las calidades más extremas (CI y CIII), básicamente en contenido de azúcares y porcentaje de lípidos. También el crecimiento y la producción son influenciados por la calidad de sitio. Esto indica que los rendimientos en volumen de fuste en arboles individuales varían con la densidad y clase de sitio, como consecuencia de esto se propone que el manejo silvicultural para *Prosopis alba* se adecue a las calidades de sitio.

Palabras claves: Índice de Sitio, algarrobo, Silvicultura

**Site quality as a determining factor for growth and fruit quality from plantations
Prosopis alba Griseb in Santiago del Estero, Argentina**

ABSTRACT

Forestry has evolved towards more precise schemes at the stand level, for which site variables play a fundamental role. This new silvicultural approach requires a broad knowledge base to understand the dynamics and productivity of the species. The objective of the work was to determine the influence of the site on the growth and quality of fruits of *Prosopis alba* Griseb plantations in the province of Santiago del Estero, Argentina, as a contribution of new knowledge that supports silvicultural decision making. The work area is within the irrigation area of the Dulce river in the province of Santiago del Estero. The database comes from temporary, permanent plots and growth data from analysis of dominant tree stems extracted from plantations. In each plot a general survey of the site was carried out and the soil profile in pits was characterized. For this, edaphic and physiographic variables were evaluated. Different growth models were tested to characterize the evolution of the dominant height. Preliminary results indicate that the estimation of the productive capacity of the sites for *Prosopis alba* Griseb can be expressed from the family of anamorphic curves. The pattern of evolution in height was adjusted with the Gompertz model, with the mixed non-linear models having the best adjustments. With this model, three site qualities were established for the species: I (High), II (Medium) and III (Low). The quality of the site in relation to edaphic factors, shows that growth is negatively conditioned above a saline threshold, altering productivity. Preliminary results in the nutritional quality of the *Prosopis alba* pods in relation to the quality of the site indicate a variation influenced by the most extreme qualities (CI and CIII), basically in sugar content and percentage of lipids. Also growth and production are influenced by site quality. This indicates that the yields in stem volume in individual trees vary with the density and class of the site, as a consequence of this it is proposed that the silvicultural management for *Prosopis alba* be adapted to the site qualities.

Key words: Site index, Algarrobo, Forestry

1. INTRODUCCION

Los bosques cultivados han sido implantados por el hombre con múltiples y diversas funciones a lo largo de la historia de la humanidad, para el bienestar de las sociedades, entre las que se destaca la importancia de los servicios ecosistémicos. Sea cual fuere el objetivo para el que fueron creados, el silvicultor dispone de una variada gama de medidas y técnicas silvícolas para implementar en la gestión de las masas forestales y conseguir maximizar la productividad. Una de las etapas fundamentales en la gestión forestal, una vez definido el objetivo que se persigue, lo constituye la planificación de la Silvicultura. En el mundo forestal, la Silvicultura extensiva ha evolucionado hacia una Silvicultura sitio-específica, que es más precisa a nivel de rodal, considerando las variables del sitio y la disponibilidad de nuevas tecnologías, que posibilita a los silvicultores implementar una gestión de estas características. Este enfoque silvícola requiere de una base amplia de conocimientos que permitan entender la dinámica y productividad de la especie con que se trabaja (Pezzutti, 2014). Para ello, es necesario introducir el concepto de calidad del sitio, referida a la productividad potencial de un sitio para una especie particular (Clutter et al., 1983). Según Schlatter y Gerding (2014), "La calidad de un sitio es el resultado de la interacción de los factores clima y suelo con la especie o grupo de especies que estén establecidas en él, medido en términos de desarrollo o productividad". Uno de los instrumentos usuales para evaluar cuantitativamente esta calidad, es el denominado Índice de Sitio.

Los conceptos de calidad de sitio e Índice de Sitio, son de máxima importancia en la Silvicultura de plantaciones y su predicción constituye uno de los elementos centrales en la planificación del uso de la tierra con fines forestales (Valle Arango, 1993). En diversos países han trabajado con curvas de Índice de Sitio, por ejemplo España ha tenido un gran desarrollo en los estudios sobre *Pinus halepensis* (Montero et al., 2000; Montero et al., 2001; Rojo Alboreca, 2017). En Latinoamérica, ha sido ampliamente estudiada la aplicación de Índices de sitio y su relación con los factores del sitio, implementado en el manejo de especies como *Eucalyptus urophylla* en Venezuela (Carrero et al., 2008), *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* en Cuba (Barrero Medel et al., 2011), *Gmelina arborea* en México (Martínez-Zurimendi et al., 2015), *Nothofagus pumilio* en Chile (Schlatter 1994), *Eucalyptus grandis* en Brasil (de Souza Retslaff et al., 2015), determinando la relevancia en el uso de esta herramienta silvícola. Según Zárate (2017), en Argentina el desarrollo de normas de manejo silvícola, se ha producido en las zonas en donde se cultivan especies de rápido crecimiento, principalmente con especies exóticas. En décadas pasadas por ejemplo, el desarrollo de funciones de Índice de Sitio en *Eucalyptus grandis* (Crechi et al., 2011) y *Pinus elliotii*, (Fassola y Wabo, 1993) en el Litoral argentino; en especies exóticas como *Pseudotsuga menziesii* (Andenmatten y Letourneau, 1998), *Populus Nigra* var. *italica* (Amico et al., 2010) y entre las nativas, *Nothofagus pumilio* (Martínez Pastur et al, 2002) y *Nothofagus antarctica* (Lencinas et al. 2002), estudios estos realizados en la región Andino Patagónica.

Toda esta información de base generada en su momento fue de utilidad para el consiguiente desarrollo productivo acompañado por un creciente desarrollo científico y tecnológico, sumado a los beneficios económicos y fiscales a través de la ley de inversiones para bosques cultivados 25.080 (año 1999), su prorrogación y reforma, ley 26.432 (año 2008), y la prorrogación y modificación ley 27.487 (año 2019), permitiendo principalmente a la región del Noreste Argentino consolidarse con un gran potencial como sector forestal del país.

Una realidad diferente se encuentra en la búsqueda de información de base para el manejo de otras especies como es el caso de *Prosopis* sp., un género de relevancia presente en la mayor parte de la Región Chaqueña, donde crecen 28 de las 44 especies reconocidas en el mundo, de las cuales 16 son árboles y el resto arbustivas (Scambato, 2013). En esta amplia gama de especies dentro del género, se destaca *Prosopis alba* como una especie nativa de gran importancia en las regiones semiáridas (Giménez et al., 2001; Cisneros y Moglia, 2017). Constituye una de las principales especies nativas del país como fuente de madera para aserrío, así lo confirman las estadísticas, registrando para el periodo 2010-

2016, que de las 3 especies más usadas para este destino, el algarrobo ocupa el segundo lugar en importancia con un 15% de la producción total de madera proveniente en su mayoría del Parque Chaqueño (SAyDS, 2018). Si bien es valorada por la calidad de la madera, hay una creciente inserción en el mercado de productos forestales no maderables con los frutos que nos brinda esta especie, que al poseer un alto contenido de proteínas y azúcares, son usados para alimento humano y forraje (Giménez et al., 1998; Giménez, 2001; Juárez de Galíndez et al., 2005; Juárez de Galíndez et al., 2008; Ewens y Felker, 2010; Scambato, 2013; Cisneros y Moglia, 2017). En América Latina se han efectuado diversos estudios tendientes a evaluar el potencial en el uso e industrialización de los frutos de distintas especies dentro del género *Prosopis*. Así, en Chile se realizaron investigaciones en *Prosopis tamarugo*, en Perú en la Universidad de Piura, además de los estudios de industrialización del fruto de *Prosopis pallida* se han realizado estudios tendientes a relacionar el crecimiento con las variables controladas de edad, distanciamiento, profundidad de la napa freática, germinación, producción, características y usos de los frutos (Prokopiuk et al, 2000). En Argentina, se ha estudiado ampliamente el uso y potencial de los frutos de *Prosopis alba* y su consumo asociado principalmente a comunidades rurales (Sciammaro 2015; Ochoa, 1996 citado por Choge, 2007). Un aspecto importante a ser analizado es el impacto que puede tener el sitio donde crece *Prosopis alba* sobre la calidad de los frutos. Se considera necesario profundizar el estudio de la calidad de las vainas tanto para consumo humano o animal en relación con la capacidad productiva del sitio en el que crece cada rodal, la edad y la distancia de plantación.

En la región del Noroeste argentino existe una serie de investigaciones tendientes a dar respuesta a los problemas y enigmas sobre el cultivo forestal de esta especie. Estudios relacionados a la calidad genética del material de propagación, como por ejemplo Maldonado et al. (2001) realizaron la evaluación fenotípica individual de la forma del fuste y el crecimiento volumétrico en un ensayo de progenies de familias de polinización abierta en *Prosopis alba* en Santiago del Estero; y el estudio de la productividad de *P. alba* de diferentes orígenes geográficos (Ledesma et al., 2008). Salto et al. (2016) llevaron adelante una investigación en Concordia, Entre Ríos, relacionada a la producción de plantas en vivero, mediante la cual se evaluó la calidad de planta según diferentes sustratos y contenedores. En cuanto a la densidad de plantación y a los tratamientos culturales de poda y raleo, hubo avances importantes. Atanasio, (2012); Navall et al., (2015); Zárata, (2017), evaluaron la respuesta del algarrobo blanco a diferentes intensidades de poda y densidades en plantaciones experimentales en las provincias de Chaco y Santiago del Estero.

Recientemente Kees et al., (2017) obtuvo la primera curva de crecimiento en altura dominante para estimar el Índice de Sitio para la especie en Chaco. Sin embargo, es materia pendiente la evaluación de la calidad del sitio, tanto en la fase inicial de la plantación como en sitios previos a la plantación. Para la provincia de Santiago del Estero aún no se han desarrollado curvas de altura dominante y la determinación de la calidad de sitio para algarrobo. Se estima que las existencias en forestación son aproximadamente de 3000 has (datos del Inventario Nacional de plantaciones forestales MAGyP, sin publicar). Se considera de importancia contar con los conocimientos que posibiliten la clasificación de los sitios forestales para a posteriori estimar las relaciones causales que determinen la productividad de un sitio dado, basados en los factores del ambiente (Schlatter & Gerding, 1995).

La reforestación en la provincia de Santiago del Estero es una actividad que aún no se ha consolidado pero que sigue creciendo. Más del 50 % de la superficie plantada carece de manejo silvícola y ha sido establecida en áreas donde las plantaciones presentan un crecimiento heterogéneo. Para el fomento y la consolidación de la actividad forestal es necesario crear una zonificación basada en la evaluación de los sitios potenciales para *Prosopis alba* y promover el establecimiento de una cuenca forestal que concentre la producción.

En conclusión, el conocimiento sobre el manejo de la especie para la región es aún insuficiente, lo cual demanda la realización de estudios para un mejor entendimiento de los factores que favorecen y limitan su desarrollo, para planificar futuras plantaciones y labores silviculturales (Vaides et al., 2004).

En este contexto, en el presente trabajo se propone determinar la influencia del sitio en el crecimiento y la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb, en la provincia de Santiago del Estero, Argentina, con la perspectiva de aportar información y nuevos conocimientos que faciliten la toma de decisiones silviculturales.

1.1 Objetivo general

- Determinar la influencia del sitio en el crecimiento y en la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina.

1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo que permita establecer las curvas de altura dominante y el Índice de Sitio (IS), con las que se pueda inferir las calidades del sitio forestal para la especie.
- Caracterizar los factores edáficos que determinan la calidad de sitio
- Caracterizar la influencia del sitio en la calidad de frutos
- Caracterizar el crecimiento según diferentes calidades de sitio

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Origen, distribución e importancia del género *Prosopis*

La distribución natural del género *Prosopis*, constituida de 44 especies, incluye las zonas áridas y semiáridas de América, África, Asia, siendo que 40 de éstas son nativas de América (Galera, 2000; Pasiecznik et al., 2004). El género pertenece al orden Fabales de la familia Leguminosae, subfamilia Mimosoideae. En Argentina crecen 28 de las 44 especies reconocidas, de las cuales 16 son árboles y el resto arbustivas. (Pasiecznik et al., 2004; Scambato, 2013). La mayoría de las especies crecen en la provincia fitogeográfica Chaqueña, que se extiende por Formosa, Chaco, Santiago del Estero, el este de las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca y de La Rioja, el norte de San Luis, Córdoba y Santa Fe, y noroeste de Corrientes. (Cabrera, 1976; Apodaca et al., 2015).

Una de las especies de mayor dominancia en la región de estudio es *Prosopis alba* Griseb., con numerosos nombres comunes, entre ellos “Algarrobo blanco” nombrado así tanto en Argentina como Chile. Las variedades que se encuentran son *Prosopis alba* var. *alba* Griseb. y *Prosopis alba* var. *panta* Griseb.

Las condiciones del hábitat natural para la especie, se da en aquellas zonas de pluviometría de entre 500 a 1200 mm, en época estival y con temperaturas que van desde los 48 °C de máxima absoluta, hasta los -10 °C de mínima absoluta. Es una especie de gran

plasticidad en cuanto al crecimiento en distintos tipos de suelos, especialmente en los franco arenosos, tolerando ciertos niveles de salinidad. Si bien la especie crece en áreas climáticas secas, soporta anegamientos temporales (Galera, 2000).

En las zonas donde las precipitaciones varían entre 500 y 600 mm, se comporta como freatófito, encontrándose preferentemente en zonas de influencia y cauces de ríos, arroyos o paleocauces.

Es común que entre las especies del género *Prosopis* se encuentren individuos con características intermedias que responden a hibridaciones interespecíficas, resultando dificultosa la diferenciación entre ellas. Esto se debe a que las flores de los algarrobos son protóginas o sea que el estigma madura antes que las anteras, favoreciendo la fecundación cruzada. Existen numerosos híbridos: *Prosopis alba* × *Prosopis nigra*; *Prosopis alba* × *Prosopis ruscifolia*, *P.alba* × *P. flexuosa*, etc. (Galera et al., 2000).

El crecimiento de la especie en rodales naturales en la región del Chaco Semiárido la sitúa como una especie que forma parte del estrato intermedio con ejemplares de 8 a 12 metros de altura (Juárez de Galíndez et al., 2008). Los mismos autores reportan un incremento anual promedio en diámetro para un árbol tipo de 0,40 cm.año⁻¹ y consideran que el descenso en la tasa de crecimiento comienza a los 60 años. El crecimiento en masas implantadas es superior al observado en bosques nativos, registrándose mayores crecimientos promedios, en el orden de 0,81 cm.año⁻¹, variable entre 0,42 y 1 cm.año⁻¹ (Navall y Senilliani, 2004). Un comportamiento similar al observado en otras especies del género, precisamente *Prosopis laevigata* y *Prosopis glandulosa* en el Noreste de México (Foroughbakch et al., 2014).

Múltiples estudios describen los beneficios directos e indirectos del uso del algarrobo. Se considera una especie multipropósito usada para forraje, alimento humano, leña, carbón y madera (Prokopiuk et al., 2000; Giménez et al., 2001; López, 2005; Di Marco, 2013; Cisneros y Moglia, 2017). Entre los beneficios indirectos que posee en general esta especie y las restantes del género *Prosopis*, se describe el rol en la recuperación de áreas degradadas en las zonas áridas, de relevancia gracias a sus adaptaciones morfo-fisiológicas a los ambientes bajo estrés abiótico (Villagra et al., 2010; Taleinisk y Launestein, 2011), incidiendo en la dinámica de los rodales que se traduce en un aumento en la diversidad de las comunidades. Según Villagra (2000), las especies del género *Prosopis* poseen la

capacidad de tolerar sequía y condiciones edáficas adversas, como la salinidad y alcalinidad. Poseen adaptación a la herbivoría, como consecuencia presentan una posición dominante en la vegetación leñosa de zonas áridas y semiáridas de América.

La importancia de las plantaciones de esta especie en la región es que cumplen un doble rol, un fin productivo y a la vez cumplen un rol ecológico fundamental en la rehabilitación de áreas que se han degradado por el manejo ineficiente de los sistemas de riego para el cultivo agrícola. El uso de especies tolerantes a la salinidad en la forestación es una de las alternativas productivas para la recuperación de suelos degradados o afectados por salinidad. Qadir et al. (2008) sugiere entre otras especies, el uso de *Prosopis juliflora* con este objetivo por su alta resistencia a suelos alcalinos.

2.2 Geomorfología de los suelos en las áreas de estudio

El área de influencia donde crecen los rodales estudiados se localiza en la Llanura aluvial del río Dulce subunidad Paleo Llanura de Inundación, material originario fluvio-loessico, de gran heterogeneidad espacial en cuanto a las propiedades químicas de los suelos, principalmente PH, CE y contenido de sales.

En la región se destacan como elementos geomorfológicos menores los antiguos cauces de escurrimiento temporario, con dirección general de drenaje de NE-SE. Otros elementos presentes son terrazas y albardones que ocupan los planos más elevados, formados por procesos de arrastre y deposición durante los movimientos de los cursos de agua. Un tercer elemento, las playas salinas, pequeñas áreas ligeramente cóncavas, próximas a los paleocauces, comportándose como evaporadores que generan la salinización de los suelos. Las áreas de derrame, áreas deprimidas sin drenaje y las vías de escurrimiento o desagües naturales son los demás elementos que se distinguen en la zona (Boetto, 1984).

2.3 Calidad de sitio

En las ciencias forestales el término calidad del sitio se utiliza para designar la influencia del ambiente sobre la producción de un servicio ecosistémico del bosque, ya sea

un servicio de provisión (madera, forraje, frutos), de regulación (del agua, y protección del suelo), de apoyo (conservación de la vida silvestre que los habita y la biodiversidad,) y cultural (valoración estética, recreación) (Schlatter y Gerding, 2014). La calidad de sitio es la respuesta en el desarrollo de una determinada especie a la totalidad de las condiciones ambientales existentes en un determinado lugar (Prodan, 1997). En plantaciones forestales cuyo propósito es la explotación maderera, la calidad de sitio se define como su potencial para la producción de madera de una especie o un tipo de bosque, considerando que las mejores calidades tendrán mayor producción (Clutter et al., 1983).

La clasificación de los sitios es un paso fundamental en el manejo de rodales y bosques, siendo las curvas de altura dominante e Índice de Sitio componentes básicos para predecir con cierta precisión el crecimiento y la producción futura. Haciendo uso de estos elementos de clasificación es factible posteriormente establecer relaciones causales que determinen la productividad en un sitio basados en factores del medio ambiente (Schlatter & Gerding, 1995). Conociendo estos factores determinantes de las calidades de un sitio, sería de utilidad extrapolar la información a áreas que aún no han sido plantadas (Andenmatten y Letourneau, 1998).

2.3.1 Índice de Sitio

Como la productividad es un concepto biológico que no tiene representación numérica, se opta por representar la calidad de sitio a través de un valor o índice denominado Índice de Sitio (Prodan, 1997). Se define el término Índice de Sitio dasométrico (IS) como el valor numérico dado por la altura dominante (H_d) de un rodal a una edad determinada, llamada edad base (Alder, 1980), y se emplea como indicativo de la calidad de sitio. El criterio para definir la edad base, habitualmente es arbitrario y elegido en función de la situación (Thrower, 1989). Sin embargo, el mismo autor expresa que en especies del este y oeste de Norte América usualmente se definió la edad de base en relación a la longevidad de la especie, así se estableció 100 años en el caso de especies de larga vida, 50 años en especies de corta longevidad y 25 años o menos para plantaciones jóvenes o especies manejadas con rotaciones cortas (Thrower, 1986).

Para la valoración de la calidad de sitio en rodales coetáneos se usan habitualmente los métodos indirectos, que no estiman directamente el volumen que produciría un rodal a

una edad determinada sino que usan variables de fácil medición relacionadas con la productividad de un rodal. Este método usa la altura dominante (H_d), ya que es la variable capaz de vincularse para predecir la cantidad de madera a producir en un sitio particular con mayor exactitud que cualquier otra variable, al ser menos influenciada por la densidad del rodal (Daniel et al., 1982; Skovsgaard and Vanclay, 2008; Fernández et al., 1994). La identificación de árboles dominantes puede realizarse según diferentes criterios: clase de copa, árboles de mayor altura, o árboles de mayor tamaño.

Criterios en la determinación de la Altura dominante

La altura de la masa forestal es un indicador del potencial de crecimiento de la misma en un sitio. Según Prodan (1997), se pueden considerar en un rodal, las alturas absolutas que serán dependientes de la especie, edad, sitio y manejo del rodal y por el contrario, las alturas relativas del rodal que dependerán del diámetro, de la posición sociológica de los pies y de otros factores que no son medidos directamente en forma cuantitativa.

Un tipo de altura a considerar son las alturas medias, que se definen sobre la base de la distribución de frecuencias de las alturas de los árboles, algunas de ellas son: *altura media aritmética* (promedio del total de árboles de un rodal), *altura media de Lorey* (altura media ponderada al área basimétrica por clase de diámetro), *altura del fuste de área basimétrica media* (determinada a partir del árbol de área basimétrica media) y *altura del fuste de área basimétrica mediana* (en función del árbol de área basimétrica mediana). Otro tipo de alturas consideradas en el estudio de calidad de sitio y citadas como las más apropiadas son las alturas dominantes, que representan una altura media relativa a la masa pero relacionada con una cierta categoría de pie, un estrato o un determinado número de individuos entre los más altos o más grandes (Kramer, 1959; 1961; Rondeux, 2010).

La altura dominante varía en forma continua con el tiempo y es independiente del manejo de rodal a diferencia de las alturas medias, lo que permite ser usada como una buena expresión de crecimiento de la masa. Se aplican diferentes criterios, entre ellos la altura del árbol de área basimétrica media de los 100 árboles más gruesos por hectárea otro es la *altura de Assman*, definida como la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea u otra variante como la altura media de todos los árboles mayores que el diámetro medio sumado dos desviaciones estándar ($d_m + 2\sigma$) (Assman, 1970).

Según Herrera y Alvarado (1998), la variabilidad observada en la altura dominante o incremento en altura a edades tempranas en un rodal puede deberse a factores no relacionados al potencial del sitio sino que están expresando variabilidad genética, técnicas y producción en vivero, entre otros. Por esta razón, la edad de evaluación más indicada para definir el Índice de Sitio suele ser, cuando la plantación ha superado los estadios iniciales. Por lo tanto los modelos para la predicción del potencial productivo del sitio deben considerar este aspecto. La determinación de la edad a la cual se fija el IS (edad base) es de importancia ya que la falta de precisión en la determinación de la misma puede producir errores en la clasificación de las calidades. Diversos autores definen como criterio para determinar la edad base en especies de crecimiento lento, la edad próxima a la mitad del turno o cuando la especie culmina el incremento medio en altura, cuando sea menos probable que se produzcan cambios en la posición relativa de las curvas (Ortega y Montero, 1988).

2.3.2 Curvas de crecimiento en altura dominante y el índice de sitio

Según Prodan (1997) existe multiplicidad de métodos para el desarrollo de funciones de Índice de Sitio que dependen del principio, tipo de dato y método de construcción. Los principios posibles son anamorfismo y polimorfismo. En el primero se considera que el desarrollo de la altura en función de la edad para todos los sitios expresa una proporcionalidad constante, generando las denominadas curvas anamórficas. En el segundo principio, el desarrollo de la altura-edad en el rodal puede presentar diferentes formas de acuerdo a las particularidades de cada sitio, no existe tal proporcionalidad y la altura no depende de la edad, generando las curvas polimórficas. Con respecto al tipo de dato, las parcelas de tipo temporal con una serie de datos altura-edad, solo permite construir curvas de tipo anamórficas a diferencia de parcelas permanentes o análisis de fustes, donde se pueden recrear series de crecimiento más extensas que podrán facilitar la identificación de posibles polimorfismos en el crecimiento.

Existe gran cantidad de estudios donde se utiliza el IS para evaluar la productividad de las especies forestales. En Centroamérica los estudios se iniciaron en la década de los 50 (Goitia, 1954), con mayor número de trabajos en bosques templados y escasos estudios en bosques tropicales (Gutierrez y Mize, 1993). En nuestro país, en la región mesopotámica, existen estudios de crecimiento de la altura dominante en plantaciones de coníferas y latifoliadas de rápido crecimiento. Crechi et al. (2011), realizaron un estudio de Índice de

Sitio en *Eucalyptus grandis*, empleando tres métodos tradicionales, curva guía, reparametrización del modelo y ecuaciones diferenciales. En la provincia de Chaco, Kees et al. (2017) trabajaron con curvas de crecimiento en altura dominante para la misma especie. En Santiago del Estero, Juárez de Galíndez et al. (2005), realizaron la modelación del crecimiento en algarrobo blanco empleando dos modelos biológicos mediante el análisis del fuste en individuos de monte nativo.

2.3.3 Índice de Sitio en relación al ambiente

Un método indirecto alternativo a los nombrados anteriormente para la estimación del IS es el método vegetacional que estudia las relaciones existentes entre la cubierta vegetal (especies indicadoras) y la productividad de un sitio. El método ambiental es otro de los métodos alternativos, que relaciona la calidad del sitio con características como clima, suelo, topografía (Daniel et al., 1982; Schlatter y Gerding, 1995). En estudios sobre amplios espacios territoriales o en áreas con condiciones de marginalidad climática para una especie forestal sobresalen necesariamente los factores del clima como aquellos que definen primero la presencia y luego el grado de desarrollo de la especie. Sin embargo, en condiciones de clima local, especialmente si éste no tiene grandes variaciones, son los factores del suelo los que deciden si una especie forestal puede establecerse y cuál será su nivel de producción (Schlatter J., 1991).

En bosques de Europa y del subtrópico se han realizado estudios de calidad de sitio, que si bien son aplicados a especies propias de dichas regiones, es pertinente el antecedente en cuanto a la metodología empleada. Mellado (2012) desarrolló un modelo discriminante capaz de predecir la calidad del sitio de rodales de *Pinus sylvestris* L. en los páramos ácidos de León y Palencia a partir de parámetros topográficos, edáficos y climáticos. Mollinedo et al. (2005) ajustaron modelos para la predicción del Índice de Sitio para *Tectona grandis*, a partir de factores edáficos y Ferraz Filho et al. (2011) analizaron la influencia de las variables climáticas en la proyección de la altura dominante en rodales de *Eucalyptus*. Valdés et al. (1994) realizaron un estudio en *Pinus oocarpa*, estratificando grandes extensiones hasta llegar a áreas menores o micrositos, en relación a factores ambientales y su incidencia sobre la especie. Méndez Paiz et al. (2016) estudiaron la influencia de los factores del sitio en el crecimiento de *Tabebuia donnelsmithii* Rose, en plantaciones en Guatemala. Montero Mata (1999) comprobó modelos de Índice de Sitio para

Tectona grandis y *Bombacopsis quinata* mediante el método indirecto, utilizando los factores fisiográficos, climáticos, edáficos y foliares en los sitios con plantaciones de mayor edad en Costa Rica.

En la región patagónica de Argentina, estudios del CIEFAP, determinaron modelos predictores del Índice de Sitio para pino oregon en función de variables ambientales (Davel y Ortega, 2003).

En el mismo sentido, diversos autores estudiaron al género *Prosopis*, Salazar Zarsosa (2018) evaluó la variabilidad funcional de *Prosopis pallida* frente a factores climáticos y edáficos en un gradiente ambiental en Perú. En la Región del Monte, Argentina, Villagra (2000) analizó el control que ejercen los factores ambientales bióticos y abióticos sobre la estructura y dinámica de las poblaciones de algarrobos. En lo que respecta a *Prosopis alba*, los estudios en este tema son incipientes, Pérez et al. (2011), realizaron la evaluación preliminar de la calidad de sitio mediante la utilización de criterios dasométricos. Vicentini et al. (2011), realizaron las primeras evaluaciones de los efectos del suelo en forestaciones de *Prosopis alba* Griseb de la provincia de Formosa, Argentina.

Uno de los factores del sitio de gran relevancia en las regiones áridas y semiáridas que influyen en el crecimiento y productividad es la salinidad en los suelos. Numerosos autores han estudiado esta problemática y su influencia en la vegetación (Hafeez et al., 1988; Rhoades y Chanduvi, 1999; Meloni, 2004; Geetanjali, 2008). Algunas experiencias locales han registrado crecimientos promisorios de *Prosopis alba* en áreas de influencia y cuenca del río Dulce en suelos afectados por salinidad (Arcos et al., 2013; Toll Vera et al., 2016).

En este estudio se optó por los IS dasométrico y ambiental. El primero se define como el índice que define las calidades de sitio en función de la relación de las variables alturas dominantes (Hd) y edad. El IS ambiental se refiere al IS dasométrico en relación a los factores ambientales fisiográficos y edáficos, concluyendo con la determinación de cuales factores influyen y de qué manera en el crecimiento. El uso de estos índices es fundamental para la adecuada planificación forestal como también para predecir la calidad de determinado sitio donde aún no existen plantaciones pero donde sí se conocen las variables ambientales (Davel y Ortega, 2003).

2.4 Calidad de frutos

Es importante considerar otras variables que describan la productividad no maderera de esta especie según la calidad de sitio. La fructificación es un importante factor a tener en cuenta, por el reconocido valor que tienen las vainas del género *Prosopis* para consumo humano. Sciammaro (2015) caracterizó las harinas provenientes de vainas de diferentes regiones, concluyendo que las harinas para el consumo humano son altamente energéticas por su elevado contenido de azúcares pero que en general los valores varían con el tipo de especies, región y año de recolección. Otro aporte significativo del uso de frutos es por ejemplo el potencial aporte en la producción silvopastoril, ya que la palatabilidad y valor nutritivo de las hojas y frutos del algarrobo la convierten en una especie de interés alimenticio. En el contexto regional es un factor clave del uso silvopastoril, generando proteínas animales en ambientes periféricos como regiones áridas y semiáridas.

Trabajos previos sobre calidad forrajera del género *Prosopis* spp. indican que el fruto de estas especies contiene entre 1,3 – 3,5% de materia grasa (Zolfaghari, 1986; Silva et al., 2000; Boeri et al., 2017), 9 – 17% de proteína, (Zolfaghari, 1986; Oduol et al.,1986), 22 – 30% de fibra cruda, 3 – 4,9% de cenizas (Silva et al., 2000; Freyre et al., 2003), 15 – 38% de carbohidratos (Oduol,1986) y una alta digestibilidad con un valor de 59% (Habit, 1981), observándose variación de la calidad forrajera entre especies, entre sitios, y aún dentro de la misma especie (Díaz y Karlin, 1988, citado por Silva et al., 2000).

Según Oduol et al. (1986) existe interacción entre familias del género por sitio para el contenido de carbohidratos, sugiriendo que los programas de selección y reproducción para esta característica deberían considerar la calidad del sitio en el que se va a plantar. A la inversa, el contenido de proteínas fue relativamente estable en su estudio para los sitios probados. Corona-Castuera et al. (2000) concluyen que el análisis proximal en vainas de *Prosopis*, presenta mayores porcentajes de carbohidratos en árboles con poda que en aquellos sin poda, con diferencias significativas en los parámetros humedad, cenizas de extracto etéreo, fibra cruda y proteínas, según la fecha de colecta de vainas durante el período de fructificación, con mayores valores cuando la misma se realiza hacia el final del mismo.

Esto sugiere que la calidad de frutos para uso forrajero o alimenticio está sujeta a diferentes condiciones, como ser la maduración de la vaina y disponibilidad espacial en el sitio.

2.5 Crecimiento y producción

El conocimiento de la productividad forestal de una especie es de vital importancia en materia de gestión de bosques, requiriéndose conocer el desarrollo y la dinámica de las masas forestales para una correcta estimación de la producción (Rondeux, 2010). Así mismo, Decourt (1973) conceptúa la productividad primaria neta o producción total como la diferencia entre la materia asimilada y las pérdidas, que en vegetales se trata fundamentalmente de la respiración. En el vocabulario forestal se menciona la producción útil, como aquella parte variable de la producción primaria, expresada en términos de volumen utilizable (Decourt, 1973). Ésta producción estará estrechamente ligada a la calidad del sitio forestal pudiéndose identificar a cada una de ellas a través de índices de productividad. El Índice de Sitio es uno de ellos y asociarlo al crecimiento a través de sus características dendrométricas (DAP, densidad, área basal), permitirá describir el crecimiento de las masas y con ello se podrá predecir la producción.

El crecimiento forestal es el aumento de tamaño ya sea expresado a nivel de árbol individual o a nivel de rodal. En este último caso, puede referirse a un valor de cambio de una variable del árbol promedio del rodal o a valores acumulados por unidad de superficie. La determinación del crecimiento de los árboles individuales es la base para evaluar el crecimiento de rodales (Cancino, 2006).

El crecimiento de los árboles está bajo la influencia de sus características genéticas, sus interrelaciones con el ambiente, como así también con la competencia de cada uno con otros individuos vecinos/circundantes (Alder, 1980). El crecimiento se evalúa en un período de tiempo determinado siendo el año la unidad de tiempo habitual para el estudio del crecimiento de un árbol o de un rodal. De aquí, podemos definir algunos tipos de crecimientos: el crecimiento total o acumulado en un determinado momento (IA), el crecimiento o incremento corriente anual (ICA) que corresponde a la diferencia entre el tamaño al inicio y al final de un año de crecimiento y el crecimiento o incremento medio anual (IMA) que expresa el promedio a cierta edad del árbol (Imaña y Encinas, 2008). La

determinación de los citados crecimientos o incrementos es necesaria para definir esquemas de manejo en las masas forestales, como por ejemplo el turno o rotación, siendo una de las alternativas, cuando ambos incrementos anuales del rodal (ICA e IMA) son iguales (para un rodal coetáneo, turno de máxima producción sostenible).

La evolución de las magnitudes de las variables de un árbol o un rodal coetáneo, describe gráficamente una curva de tipo sigmoidea con un punto de inflexión y una asíntota, que cuando es expresada en volumen es llamada curva de rendimiento o producción (Prodan, 1997). La curva sigmoidea de crecimiento total o acumulado guarda estrecha relación con las curvas del ICA e IMA, cumpliéndose que en el punto de inflexión de dicha curva el ICA presenta su valor máximo o culminación del crecimiento, mientras que el IMA sigue en ascenso y muestra su máximo punto posteriormente, en donde la curva de crecimiento total se aproxima a su máximo y se torna en una asíntota.

En el estudio del crecimiento, entre las variables dendrométricas más usuales se encuentran la altura, que presenta la culminación más temprana en la etapa juvenil por la velocidad de crecimiento, llegando a su máximo a edades más tempranas que las demás magnitudes (Imaña y Encinas, 2008). Es la variable más sensible a la calidad de sitio y la más indicada para su evaluación, principalmente las alturas dominantes (Kramer, 1959; 1961; Rondeux, 2010). El diámetro, generalmente llega a un máximo después del crecimiento en altura y está influenciado principalmente por la densidad y el sitio.

El crecimiento de un árbol es el resultado de la influencia de distintos factores como la edad del árbol, clima y disturbios (Villalba 1988, Juárez de Galíndez, 2005) y es posible el empleo de los anillos de crecimiento para estudiar la velocidad de crecimiento como determinar estructuras poblacionales en relación a los factores del ambiente (Villalba et al., 2000). Numerosos autores estudiaron el crecimiento a partir del análisis del fuste (Ríos et al., 2001; Juárez de Galíndez et al., 2005; Giménez et al., 2007; Giménez et al., 2013; Rossi, 2014), con el objetivo de determinar parámetros de manejo y rendimiento. Debido a la influencia que ejercen los distintos factores sobre el crecimiento del árbol, diversos autores sugieren el uso de la técnica de suavizado a las series individuales (Perpiñal et al., 1995; Juárez de Galíndez et al., 2008). Esta técnica consiste en el suavizado o filtrado de las series dendrocronológicas, herramienta que permite separar la señal de interés (debida a la edad del individuo) de otras fuentes de variación que afectan el ancho de los anillos de crecimiento

de un árbol, antes de la modelación del crecimiento biológico poblacional (Juárez de Galíndez et al., 2008).

Otro enfoque, es el estudio del crecimiento en rodales, donde, además de los incrementos individuales, el número de individuos puede variar con el transcurso del tiempo, como resultado de las incorporaciones de nuevos individuos y/o la disminución del mismo por mortalidad natural o raleos planificados (Cancino, 2006), en este caso, la estimación de los parámetros del crecimiento se realiza en mediciones sucesivas con valores promedios o acumulados. En plantaciones de *Prosopis* en el área de riego del río Dulce, algunos de los autores que trabajaron este enfoque fueron Navall (2015) y Zárate (2017), determinando con ello las prácticas silvícolas más adecuadas para maximizar la calidad y volumen de fuste.

Existe una correlación biológica y matemática entre los parámetros del crecimiento y la productividad (Imaña y Encinas, 2008), que da la posibilidad al gestor forestal de contar con funciones de estimación de las variables del árbol con un error aceptable que simplifique las tareas, cuando es imposible tomar el dato directamente sobre el individuo o determinar el volumen a través de la cubicación de las secciones del fuste (Prodan, 1997). La altura total (HT) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) son variables altamente correlacionadas y con un papel importante en el modelado del crecimiento y de la producción de las masas forestales (Peng, 2001; Barrio Anta et al., 2004; Juárez de Galíndez et al., 2006, 2007). Una de las aplicaciones de la relación entre estas dos variables es la posibilidad de predecir la altura de los árboles en función del diámetro, que es la variable de más fácil medición (Larsen y Hann, 1987) y facilitar la tarea en la gestión forestal. Se citan ejemplos en la determinación de alturas dominantes mediante este método, Bengoa (1999) sostiene que esta relación puede ser usada con el objetivo de evitar que la altura dominante fuera infra-valorada cuando el diámetro dominante se estime en base a pocos árboles, donde puede ocurrir que árboles bastante gruesos presenten, por diversas razones, alturas menores que otros árboles más delgados; este peligro de subestimar la altura dominante queda amortiguado al utilizar la curva de diámetros-alturas. Este y otros son los usos citados por la literatura. Diversos autores han correlacionado estas variables obteniendo mediante regresión dos tipos de curvas: "HT-DAP locales" de uso acotado a rodales específicos y "de HT-DAP generalizadas" que incluyen variables de masa o de rodal que consideran la densidad y/o la calidad de sitio (Lappi, 1997, Calama y Montero, 2004, Aguilar Arias, 2004, Sharma y Parton, 2007, Trincado et al., 2007).

2.6 Modelos de crecimiento clásicos y modelos contemporáneos mixtos

Diversos estudios sobre el crecimiento en árboles obtuvieron curvas de crecimiento usando modelos clásicos, (Arreola et al., 2004; Galíndez et al., 2005; Amico et al., 2010; Machado et al., 2011; Attis Beltrán et al., 2015; Ribeiro et al., 2016; Kees et al., 2017) descritos en forma implícita de la siguiente forma:

$$y = f(X, \Theta, \varepsilon)$$

Donde, y es el vector de observaciones (variable dependiente), f es una función lineal o no lineal en los parámetros, X es la matriz de diseño (variables independientes), Θ un vector de parámetros de efectos fijos y ε un vector de errores que se asumen con distribución normal e independientes con media de 0 y matriz de varianzas constantes (Balzarini et al., 2005; Carrero et al., 2008).

Según Carrero et al. (2008), el hecho de realizar mediciones repetidas sobre el mismo sujeto implica que no es posible aleatorizar el factor tiempo, por lo que las medidas tomadas sobre un mismo individuo están autocorrelacionadas y, por tanto, no se cumple el supuesto de independencia de los errores (Schabenberger y Pierce, 2002). Asimismo, los modelos de crecimiento se caracterizan por un incremento de las varianzas de los errores con la edad (heterocedasticidad), razones por la cual se propone ajustar modelos estadísticos contemporáneos, entre los que se destacan los modelos lineales mixtos que constituyen herramientas innovadoras para el tratamiento de datos correlacionados, ya sea espacial y/o temporalmente (Rodrigues et al., 2013; Córdoba, 2014), que flexibilicen los supuestos de los modelos clásicos. El modelo mixto permite modelar la estructura de los errores en datos provenientes de mediciones longitudinales y se puede describir agregando un vector de efectos aleatorio de la siguiente manera:

$$y = f(X, \Theta, b, \varepsilon)$$

Donde y es el vector de observaciones (variable dependiente), f es una función lineal o no lineal en los parámetros, X es la matriz de diseño (variables independientes), Θ es el vector de parámetros de efectos fijos, ε es el vector de errores y b es el vector de efectos aleatorios que modela la heterogeneidad entre sujetos.

Existen en Europa y Latinoamérica estudios previos con este enfoque, como la modelización de la altura en función del diámetro para masas regulares de *Pinus pinea* en Valladolid, España, mediante el ajuste de modelos mixtos con coeficientes aleatorios (Calama Sainz y Montero González, 2004). La determinación de curvas de IS basadas en modelos mixtos para plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.F.) en los llanos de Venezuela, en dicho estudio Jerez-Rico et al. (2011), concluyeron que el análisis de los resultados muestra un mejor ajuste con modelos no lineales mixtos respecto a los modelos clásicos en términos de sesgo y precisión, mostrando la conveniencia de usar modelos que consideren mediciones repetidas en una misma parcela. Así mismo, Juárez de Galíndez et al. (2008), usaron los modelos mixtos para determinar la edad de aprovechamiento de un individuo tipo de algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Santiago del Estero, Argentina. Para ello modelaron la señal biológica contenida en las series de anchos de anillos con una función logística de intercepto aleatorio para entender mejor las variaciones del crecimiento entre individuos de la misma especie bajo las mismas condiciones ambientales. Según expresan Juárez de Galíndez et al. (2008), las mediciones de anchos de anillos desde una muestra dendrocronológica constituyen medidas repetidas en el mismo individuo que se caracterizan por estar serialmente correlacionadas. Este tipo de mediciones poseen una estructura de datos longitudinales, siendo estas observaciones tomadas en forma repetidas sobre una unidad observacional; en este caso, la estructura de la matriz de varianzas y covarianzas de los residuos no corresponde con los supuestos de los modelos de regresión clásicos, ya que no es posible aleatorizar el factor temporal, violándose el supuesto de independencia de los errores (Schabenberger y Pierce, 2002), como también se puede dar heterocedasticidad en la relación crecimiento-edad con el tiempo. Ante esta situación, los modelos mixtos son una alternativa para lograr una mayor precisión (West et al., 2006).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1.1 Ubicación geográfica

El área de estudio se sitúa en el Complejo Valle del río Dulce perteneciente a la Subregión del Chaco semiárido en la Ecorregión del Chaco seco de la República Argentina (Morello, 2012). Esta comprende una vasta planicie que presenta una suave pendiente hacia el este y se extiende sobre la mitad occidental de Formosa y Chaco, la oriental de Salta, Santiago del Estero, norte de Santa Fe y Córdoba, sectores de Catamarca y La Rioja (Morello, 2012). La zona de trabajo se encuentra dentro del área de riego del río Dulce en la provincia de Santiago del Estero, delimitada por la latitud 27° 39´S y 27° 56´S y longitud 63° 50´O a 64° 11´O, abarcando 110.000 ha aproximadamente con un área de influencia general de 275.365 ha (FIGURA 1).

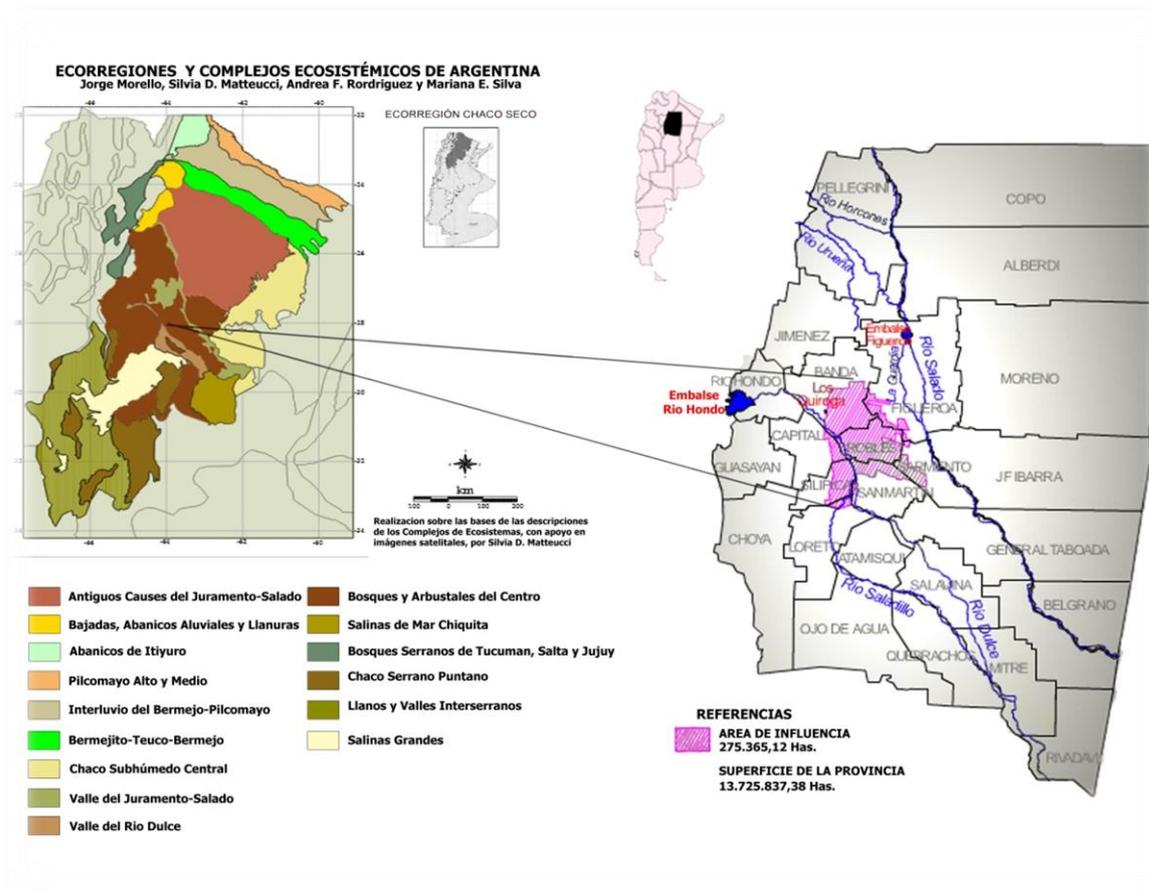


FIGURA 1: Mapa de la provincia de Santiago del Estero, localizado en la Ecorregión del Chaco Seco, República Argentina. Fuente: la autora, en base a Morello et. al., (2012) y Unidad Ejecutora del servicio de riego del río Dulce (2017).

3.1.2 Características ambientales

El clima en la subregión del Chaco Semiárido se caracteriza por ser subtropical con estación seca, con déficit hídrico y variabilidad climática dentro del ciclo anual y entre periodos anuales. Su gran extensión genera dos importantes gradientes climáticos: en sentido Este-Oeste en el que las precipitaciones disminuyen y en sentido Norte-Sur, en el cual lo hace la temperatura. Están presentes las porciones más extensas de las antiguas áreas de divagación y las actuales bajas cuencas de los ríos Pilcomayo, Bermejo, Juramento-Salado y Salí-Dulce (Redaf, 1999). Esta última cuenca abarca tres provincias, Santiago del Estero, parte de Tucumán y Córdoba. En la ciudad de Santiago del Estero la precipitación media anual oscila entre 540 y 560 mm, llegando a los 750 mm en el noreste de Córdoba. La temperatura media del mes más cálido llega a 26,9°C y la del mes más frío

es de 12,6°C, ambas medias disminuyen hacia el sur. La estación lluviosa se extiende de octubre a marzo y el resto de los meses comprende la estación seca (Redaf, 1999). Los suelos del área se caracterizan por haberse desarrollado a partir de sedimentos depositados por el viento (limos loésicos) y movilizados por el río Dulce. En los mismos predomina el limo y la clase textural dominante es franco limoso (Galizzi et al., 1998). La arcilla es la fracción granulométrica que se encuentra en menor cantidad. Según Galizzi (1992), la Illita es el mineral aluminio silicatado que predomina en la fracción textural menor a 0,002 mm. El porcentaje de saturación varía entre 410 - 300 g.kg⁻¹ siendo mayor en el horizonte A y menor en los horizontes profundos, lo cual está asociado con los más altos contenidos de materia orgánica y de arcilla. Son suelos poco evolucionados con secuencia de horizontes A-AC-C y no hay gran diferenciación en el perfil.

Las áreas de influencia de este estudio comprenden bosques y vegetación dentro de la cuenca del río Dulce, que adopta características distintivas con respecto a la subregión del semiárido. Se presentan comunidades riparias, con la presencia de los géneros y especies: *Aspidosperma quebracho- blanco* Schltl. (quebracho blanco), *Lycium* spp, *Schinopsis* spp, *Prosopis sericantha* Gill. Ex Hook & Arn.(algarrobilla) y *Prosopis alba* Griseb (algarrobo blanco). Se trata de un fachinal abierto dominado por *Vachellia aroma* ex Hook.&Arn.(tusca), *Celtis iguanaea* (Jacq.) Sarg.(tala) con árboles aislados de *Schinopsis lorentzii* Griseb (quebracho colorado) y *Sarcomphalus mistol* Griseb (mistol) (Sarmiento, 1963; Redaf, 1999).

3.1.3 Caracterización socioeconómica

La estructura agraria dentro de la cuenca del río Dulce, según el Censo Agropecuario (2008), indica que se registran aproximadamente 3.217 explotaciones agropecuarias (EAP's) en la región en estudio ocupando 300.000 ha aproximadamente, con un 90% de la superficie perteneciente a EAP's con límites definidos, que en su mayoría (80%) corresponden a lotes entre 5 a 50 ha, excepto en el Departamento San Martín con mayor porcentaje de predios de mayores superficies. Esta estructura corresponde a un perfil de productor pequeño a mediano con bajo nivel de tecnificación, dedicado principalmente a la producción agrícola para consumo y venta local, manteniendo superficies importantes de los predios con cobertura de montes naturales, pastizales o sin uso discriminado.

3.1.4 Áreas de plantaciones con *Prosopis alba* en estudio en la provincia

El área donde se ubican actualmente los rodales de algarrobo blanco en la provincia corresponde a la Llanura aluvial del río Dulce, Paleo Llanura de Inundación, con material originario fluvio – loessico, que posee gran heterogeneidad espacial en cuanto a las propiedades químicas de los suelos principalmente. Según la información registrada a través de Geo-Inta (2017) a partir del mapa de suelos de la República Argentina basada en la clasificación taxonómica Soil Taxonomy (Soil Survey staff, 2014), la mayor parte de las áreas con plantaciones, se ubican en suelos MNai-7 (Haplustoles arídicos), los que se caracterizan por presentar perfiles de textura franca a franca arenosa, con baja humedad, no sódicos. Algunos rodales recaen en suelos Ektc-12 (Haplustoles salortídicos) de suelos arenosos con algún tipo de limitante de salinidad en los 50 cm superiores generalmente ubicados en vías de escurrimiento plano cóncavas y AEtc-34 (Natracualfes típico), suelos franco arenosos, de drenaje deficiente, de plano aluvial (FIGURA 2).

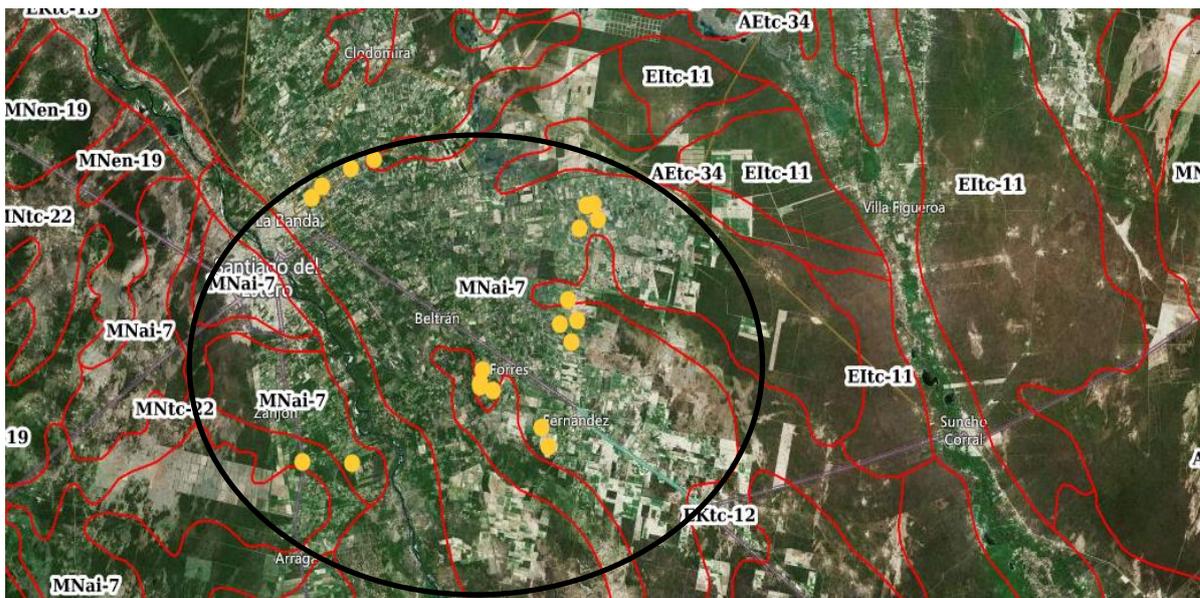


FIGURA 2: Mapa de los sitios de estudio que muestra la variación de los suelos de la región y la distribución de los puntos de muestreo. Fuente: Suelos de la República Argentina 1:500.000 y 1:1.000.000 GeoINTA.

Las plantaciones en estudio se localizan sobre los diferentes elementos geomorfológicos citados, presentando una notable heterogeneidad en el crecimiento. Algunos rodales han sido establecidos sobre áreas de terrazas o albardones y vías de

escurrimiento, con la consecuente pérdida de la plantación en las áreas más bajas (FIGURA 3).



FIGURA 3: Imagen satelital de una plantación del área de estudio ubicada sobre diferentes elementos geomorfológicos en el área de riego de la provincia de Santiago del Estero.

Otra situación influenciada por la geomorfología de los suelos son áreas deprimidas salinizadas, donde la plantación casi se ha perdido por completo o presenta un reducido crecimiento, a diferencia de las zonas que ocupan los planos más elevados con mejor respuesta en el desarrollo (FIGURA 4).



FIGURA 4: Imagen satelital de una plantación del área de estudio ubicada en una área levemente más alta (punto C3) con mejor crecimiento que el resto de la superficie plantada ubicada en áreas deprimidas del paisaje.

El conocimiento de la relación suelo-agua-planta es de importancia para comprender como es el funcionamiento de determinados ecosistemas, constituyendo el paso inicial en toda planificación del manejo de los recursos naturales (Boetto, 1984).

3.2 Metodología

3.2.1 Selección de sitios y registro de datos

Se ha considerado para este estudio el relevamiento de plantaciones adultas de *Prosopis alba*, información provista por el área de la Dirección de Bosques a cargo del Régimen de Promoción Forestal e informantes calificados.

En cada una de las plantaciones se establecieron parcelas en función de la variabilidad en el crecimiento del rodal, buscando como objetivo maximizar la variabilidad entre muestras y minimizar la variabilidad dentro de la unidad de muestreo. Diversos estudios de este tipo han usado parcelas de diferentes tamaños que fueron desde los 100 a los 1000 m², pero la mayoría ha optado por parcelas de entre 200 a 500 m², buscando el equilibrio entre el menor número de árboles a relevar y la menor variación de la productividad dentro de la parcela (Carmean, 1975; Herrera y Alvarado, 1998). Para evaluar la variabilidad se calculó el coeficiente de variación (CV) de la altura dominante (Hd) resultando en un valor máximo de 25% de variación dentro de la unidad muestral (Herrera, 1996). Se trabajó con un total de 26 parcelas ubicadas en 12 diferentes plantaciones del área de riego con edad mínima de 9 años. La base de datos utilizada proviene de parcelas temporales o sea aquellas parcelas donde se ha medido la variable de crecimiento solo una vez (PT), parcelas permanentes o sea parcelas donde se ha medido la variable de crecimiento en medidas sucesivas en el tiempo (PP) y parcelas de intervalo (PI) aquellas que se han medido dos veces (Gadow et al, 1999) (Tabla 1). Se consideraron además los datos de crecimiento provenientes del análisis epidométrico de 13 árboles dominantes extraídos en dichas plantaciones.

TABLA 1. Descripción de los sitios de muestreo según el departamento de la provincia de Santiago del Estero, las superficie y edad del rodal en la última medición, espaciamiento, caracterización del tipo de parcela, cantidad de parcelas medidas y número de mediciones realizadas.

| Dpto. | Superficie del rodal (ha) | Edad (años) | Espaciamiento | Tipo de parcela | Parcelas (#) | mediciones (#) |
|------------|---------------------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|
| Robles | 3 | 15 | 6 x 2 | PI | 3 | 2 |
| Robles | 40 | 11 | 4 x 3 | PI | 1 | 2 |
| Robles | 1 | 15 | 5 x 4 | PI | 1 | 2 |
| Robles | 50 | 16 | 5 x 4 | PI | 4 | 2 |
| Robles | 0,75 | 18 | 6 x 3 y 6 x 6 | PI | 2 | 2 |
| Robles | 0,5 | 18 | 4 x 4 | PT | 2 | 1 |
| San Martin | 0,5 | 26 | 6 x 6 | PP | 1 | 3 |
| La Banda | 3 | 16 | 5 x 3 | PI-PP | 2 | 2-4 |
| San Martin | 1 | 20 | 3.5 x 3.5 | PP | 1 | 3 |
| Robles | 10 | 11 | 8 x 2 | PT | 1 | 1 |
| La Banda | 3 | 9 | 8 x 2 | PT | 2 | 1 |
| Robles | 6 | 9 | 4 x 4 | PT | 6 | 1 |

PI: Parcelas de intervalo, PP: Parcelas Permanentes, PT: Parcelas Temporarias.

El análisis epidométrico se realizó sobre 13 árboles apeados en las parcelas de estudio de los departamentos Robles y San Martin, extrayendo de cada individuo seleccionado, tortas de 5 cm de espesor a la altura de 0,30 m (base), 1,3m, 2,0m y 3,0m. Cabe aclarar que la muestra de árboles fue acotada debido a que no se consiguió el permiso correspondiente de propietarios de otras plantaciones para la corta de mayor número de árboles. Estas muestras se prepararon en la forma descrita por Giménez et al. (1998) y luego se digitalizaron con escáner HP Scanjet G2410, a una resolución de 1.200 dpi para la medición de los anillos de crecimiento mediante el software IPWIN 4. Se trabajó sobre 4 radios perpendiculares, se consignó el número de años y el espesor del anillo con una precisión de centésima de milímetro (FIGURAS 5).

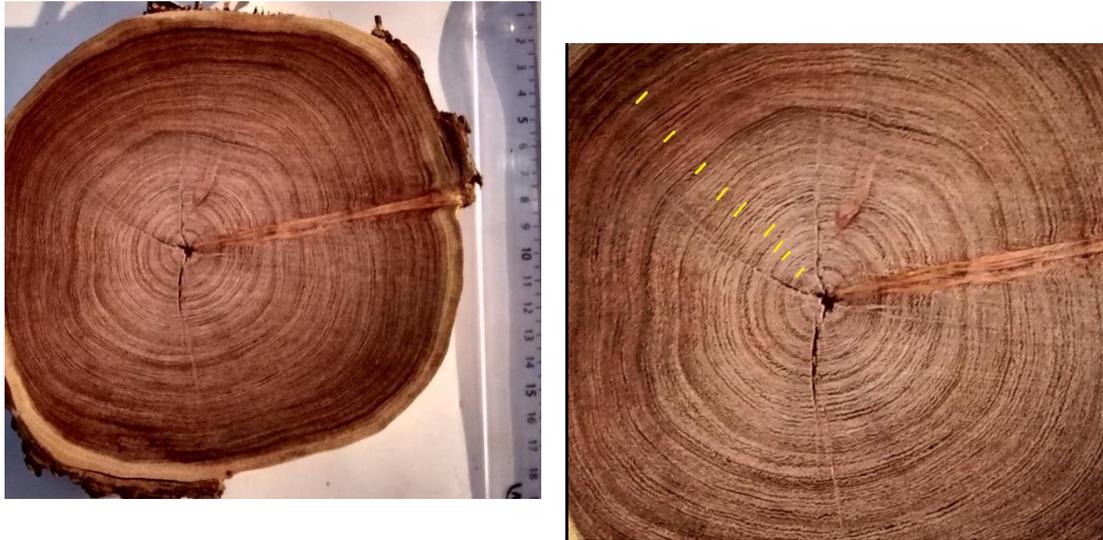


FIGURA 5: Muestra de una sección transversal correspondiente a 1,3 metros de altura (izquierda) y la misma muestra (derecha) con anillos marcados.

El criterio para la selección de las plantaciones fue una combinación de la edad y la variabilidad en los tipos de suelos, teniendo en cuenta principalmente la salinidad y las características propias de los rodales. Al momento de la plantación de estos rodales no se contaba con material genético mejorado, por lo cual se empleó germoplasma de origen local proveniente en su totalidad de áreas de colecta de semilla. Las intervenciones silvícolas realizadas comprenden 2 a 3 podas de conducción en los primeros años, un riego anual durante los primeros años, desmalezados ocasionales y en algunos casos tratamiento de raleo. El área de estudio en general se caracteriza por la presencia de la napa freática entre los 2m y 5m de profundidad aproximadamente. Las parcelas establecidas poseen un número fijo de 48 árboles, por lo cual presentan un área variable entre 576 a 1728 m², según el espaciamiento inicial de la plantación.

3.2.2 Variables registradas

Dasométricas

Para evaluar el desarrollo de los rodales, las variables a medir fueron las siguientes:

- Diámetro a la altura de pecho (DAP) en pies con único fuste o en el caso de individuos con más de un fuste, se usó el parámetro definido como el diámetro correspondiente a la

sección normal que resulta de sumar las secciones normales de cada uno de los fustes, expresados en centímetros (cm).

- Altura total del árbol (HT) y altura de fuste (Hf) de cada planta empleando vara telescópica graduada en centímetros. La Hf se define como la altura entre la base del fuste y la primer bifurcación del tallo principal. Se expresan en metros (m).

- Altura dominante (Hd) definida como la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea (Assmann, 1970). Se expresa en metros (m).

- Edad (E) expresada en años.

- Espesor de anillos de crecimiento: expresado en milímetros (mm).

Climáticas

El área de estudio se caracteriza por presentar condiciones uniformes en lo que respecta al clima y su topografía. El clima es continental cálido subtropical, con lluvias concentradas en el verano (Morello, 2012). Fisiográficamente el área en general constituye una planicie que se encuentra entre 75 a 90 m.s.n.m., con un paisaje que presenta planicies onduladas de formación eólica con hondonadas y pequeñas cubetas de deflación (Godagnone y de la Fuente, 2001).

Se buscó caracterizar la zona en función de los parámetros climáticos considerados más relevantes para el crecimiento, registrando los datos de las estaciones meteorológicas locales cercanas a las parcelas. Las estaciones consideradas fueron la estación meteorológica del Aeropuerto Santiago del Estero y la estación meteorológica de La Abrita del INTA. Entre los parámetros considerados se evaluó la temperatura media mensual y anual (°C), precipitación media anual (mm/año) y evapotranspiración potencial (mm/mes).

Se empleó el modelo de clasificación ecológica de Holdridge para la República Argentina (Derguy et al., 2016), para caracterizar la relación entre los factores climáticos y la vegetación del sitio y determinar dentro de la zonificación ecológica del país a que zona de vida pertenece el área de estudio.

Edáficas y fisiográficas

El muestreo de suelo se realizó en cada una de las parcelas. Se hizo el relevamiento general del sitio y perfil en calicatas situadas en el centro de cada parcela, extrayendo muestras de 0 a 90 cm de profundidad. Los análisis de las muestras de suelo se realizaron en el laboratorio del INSIMA, de la Facultad de Ciencias Forestales-UNSE y en el Laboratorio de Suelo, Agua y Fertilizantes (LabSA) de la Estación Experimental Agropecuaria Salta Grupo Recursos Naturales. Se realizaron análisis de pH, conductividad eléctrica (CE), cationes solubles (Sodio, Calcio, Magnesio), relación adsorción sodio (RAS), densidad aparente (DA), porosidad de la capa arable (PT), textura (Text), humedad del suelo y presencia de carbonatos (Carb).

Los factores fisiográficos, relevados fueron: pendiente en % (P), drenaje (D), permeabilidad (Pe) y relieve o posición fisiográfica (Rel). El factor relieve relacionado a la posición geomorfológica, se categorizó en plano bajo (áreas deprimidas y generalmente salinizadas), plano alto (áreas de terrazas o albardones) y plano medio (transición entre estas dos categorías).

El método de clasificación se basa en la guía de reconocimiento de suelos de la FAO. Los parámetros edáficos físicos y químicos se obtuvieron de acuerdo a las siguientes técnicas:

-pH: por potenciometría en extracto de saturación;

-Conductividad Eléctrica (CE) en el extracto de saturación expresada en mmhos/cm;

-Cationes solubles: Sodio, Potasio y Calcio más Magnesio Soluble en el extracto de saturación (meq/l);

-Relación adsorción sodio (RAS) se calculo con la formula $RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{((Ca+Mg)/2)}}$

-Densidad aparente (DA) por el método del cilindro metálico usando un cilindro de 100 cm³ (grs/cm³);

-Porosidad de la capa arable (PT) por el método del cilindro metálico (Page, 1982). Se expresa en % v/v;

-Textura y humedad del suelo: método descriptivo según la guía de reconocimiento de suelos de la FAO;

-Presencia de Carbonatos (%): método descriptivo según la guía de reconocimiento de suelos de la FAO;

Para el estudio de las variables climáticas se realizaron cálculos de valores promedios con los datos de las estaciones meteorológicas para el periodo 1991-2017. Para la evaluación de las variables edáficas se empleó el análisis multivariado (análisis de componentes principales y análisis de correspondencias múltiples) y análisis de correlación. La evaluación de las variables fisiográficas se realizó mediante el análisis de correspondencias múltiples y análisis de la varianza multivariado (AnVaMu) con contraste entre clases de calidad de sitio para visualizar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los centroides de las observaciones multivariadas de las clases y entre los centroides de las observaciones de una clase con respecto a otra.

Análisis proximal de vainas

La metodología utilizada para medir la calidad de frutos se basó en la cosecha de 2 a 3 kg de vainas en condiciones de madurez plena, en el mes de enero (estación estival), provenientes del ciclo 2015-2016 y cosechadas en árboles pertenecientes a las parcelas. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, etiquetadas y conservadas en frío para su posterior procesamiento. Para la evaluación de la calidad nutritiva se analizó el contenido de humedad, cenizas, lípidos, proteínas, fibras totales e hidratos de carbono, expresados en porcentajes. Las técnicas aplicadas para determinar cada uno de los compuestos químicos (Humedad, Cenizas y Lípidos) fueron las propuestas por la Asociación de Química Analítica Oficial (Association of Official Analytical Chemists-AOAC, 1995) que varían según el compuesto: Humedad (técnicas oficiales 27.3.06), Cenizas (técnicas oficiales 32.10.5), Lípidos (técnicas oficiales 32.1.14). También se determinó Fibra dietaria total (TDF), soluble (SDF) e insoluble (IDF), según el método descrito por Prosky & Lee (1996), Proteínas conforme al método de Hach, et al. (1987) con un factor de conversión de nitrógeno de 6,25. El contenido de Hidratos de carbono se calculó por diferencia. Los análisis estuvieron a cargo del laboratorio de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias de la UNSE.

3.2.3 Estimación de los Modelos de Índice de sitio

Criterio seleccionado en la determinación de la altura dominante

Analizando los diferentes criterios de altura planteados oportunamente, se seleccionaron para su aplicación en el estudio, la *altura de Assman*, definida como la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea (Assmann, 1970), y el $(d_m + 2\sigma)$ definida como la altura media de todos los árboles mayores que el diámetro medio sumado dos desviaciones estándar. Estos criterios fueron usados para realizar el cálculo de las alturas dominantes, comparar los resultados y determinar cuál criterio es el apropiado para los rodales en estudio.

Construcción de las curvas de crecimiento en altura dominante

En un primer paso se analizó el comportamiento de la especie a través del gráfico de dispersión de los datos altura dominante-edad observados. La generación de series altura dominante-edad se construyó a partir de datos proveniente de registros dasométricos obtenidos en terreno, constituidos por parcelas temporales, de intervalo y permanentes de medición y de datos de análisis epidométrico de los fustes de árboles seleccionados. Sin embargo en este estudio la fuente de datos principal han sido las parcelas temporales y de intervalo. Los métodos de construcción posibles de ser empleados son variados, en este caso se empleó el método de la curva guía que consistió en determinar una única función promedio en base a la serie de datos altura dominante-edad y a partir de ésta, derivar las demás curvas por un principio de proporcionalidad constante (Barrero-Medel et al., 2011; Hernández-Ramos et al., 2014).

Se propusieron diferentes modelos para describir el patrón general de crecimiento en altura dominante (Hd) en relación a la edad en masas forestales. Se verificó el comportamiento de los datos ante los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia serial de los residuos, mediante los tests/pruebas de Kolmogorov-Smirnov, de Levene, y de Durbin y Watson, respectivamente. Se evaluó el desempeño relativo y la precisión de los modelos lineales y no lineales, con efectos fijos y efectos mixtos para representar curvas de crecimiento de altura dominante, usando distintos modelos matemáticos. La aplicación de los modelos de efectos mixtos permitió modelar la estructura

de los errores en datos provenientes de medidas repetidas en el tiempo (West et al., 2006). Se evaluaron 9 modelos, entre ellos, un modelo lineal de segundo orden con errores independientes y homocedásticos y 4 modelos no lineales, Chapman-Richards, Gompertz, Monomolecular y Logístico (Tabla 2), evaluados con errores independientes y homocedásticos, y a su vez con modelación de la correlación y para varianzas heterogéneas.

TABLA 2. Modelos ajustados y sus funciones para describir el crecimiento en altura dominante en función a la edad.

| Modelo ajustado | Función de ajuste | |
|------------------------------|--|-----|
| Polinomio de 2° grado | $Hd = \alpha + \beta x + \gamma x^2$ | [1] |
| Chapman-Richards | $Hd = \alpha [1 - \exp(-\beta * E)]^\delta$ | [2] |
| Gomperzt | $Hd = \alpha * \exp[-\beta * \exp(-\delta * E)]$ | [3] |
| Monomolecular | $Hd = \alpha * (1 - \beta * \exp(-\delta/E))$ | [4] |
| Logística | $Hd = \alpha / (1 + \exp(-(E - \beta)/\delta))$ | [5] |

Hd= Altura dominante, E= edad (años), α , β , δ = parámetros a estimar.

Los datos fueron tratados y analizados estadísticamente con InfoStat (Di Rienzo et al., 2018) y su interface con el programa R (R Core Team, 2019).

Para evaluar el ajuste de los modelos se utilizaron el criterio de información de Akaike (AIC); el criterio bayesiano de información de Schwartz (BIC) y el error estándar en los parámetros. Estos criterios indican que a menor valor mayor es el ajuste, a los fines de poder comparar el ajuste de los modelos lineales y no lineales clásicos vs. modelos no lineales mixtos.

Para evaluar el ajuste del modelo seleccionado en el paso previo se estimaron los errores estándares de cada parámetro estimado de la función. A partir de estos valores se estimó el intervalo de confianza (IC) y el intervalo de predicción que fueron graficados como bandas de confianza y bandas de predicción. Para obtener los límites inferiores y superiores de los intervalos, tanto de confianza como de predicción, se recurrió al método de muestreo-remuestreo Bootstrap. Posteriormente, se obtuvo una matriz de varianzas-covarianzas de los estimadores. La diagonal de dicha matriz corresponde a las varianzas de cada parámetro estimado. Luego, la raíz cuadrada de la varianza es el valor que consideramos como error

estándar. La amplitud de la banda del IC, nos da la pauta del valor de incertidumbre de la estimación de la Hd.

Una vez definido el modelo más adecuado, a partir de la curva guía y considerando la edad base determinada se procedió a la armonización de esta curva para obtener la familia de curvas anamórficas (Alder, 1980; Prodan, 1997). Para ello, se despejó α (asíntota) en la ecuación de Índice de Sitio sustituyendo la expresión resultante en la ecuación original. Se asumió que los parámetros de forma y pendiente son comunes para todos los sitios. Se generó la familia de curvas anamórficas haciendo variar la *Edad*, el *IS* deseado para la edad base (E_b) predeterminada (Andenmatten y Letourneau, 1998; Mares et al., 2004; Barrero et al., 2011, Hernández-Ramos et al., 2014). En base a la dispersión de los datos de altura dominante obtenidos a la edad base se determinó la equidistancia entre las curvas de *IS*.

Para evaluar el modelo para la predicción del Índice de Sitio, se hizo una autovalidación, en cada clase de sitio establecida se calcularon el promedio de las alturas observadas para cada año de edad y con estos datos se estimaron los índices de sitio (IS_{est}), posteriormente se calculó el error respecto del Índice de Sitio promedio observado para cada clase (IS_{obs}) (Barret, 1978; Fassola y Wabo, inédito 1993; Andenmatten y Letourneau, 1998).

Construcción de un modelo de estimación del IS ambiental

El Índice de Sitio dasométrico obtenido en el paso previo fue correlacionado con los factores edáficos y fisiográficos nombrados anteriormente con el propósito de determinar la relación entre las variables. Entre ellos, los factores edáficos fueron pH, conductividad eléctrica, cationes solubles, relación adsorción sodio (RAS), densidad aparente (DA), porosidad de la capa arable, textura, humedad del suelo y presencia de Carbonatos. Los factores fisiográficos fueron pendiente, drenaje, permeabilidad y relieve. A cada una de las parcelas de estudio se les asignó su correspondiente clase de calidad a través del cálculo del *IS*, utilizando la altura dominante y la edad actual con la función del *IS* descrita en el ítem anterior. Para una evaluación preliminar de la correlación entre las variables se realizó un análisis multivariado con análisis de componentes principales. Dado que las variables fisiográficas y algunas de las variables edáficas son variables discretas ordinales, se realizó la codificación de las mismas para poder efectuar el análisis estadístico (Tabla 3).

TABLA 3: Codificación de variables fisiográficas y edáficas

| Código | Posición Fisiográfica | Permeabilidad | Drenaje | Humedad | Textura | Carbonatos |
|--------|-----------------------|-----------------|---------|-------------------------|------------------------|--|
| 0 | Plano bajo | | Malo | Uniformemente Seco | | Sin presencia |
| 1 | Plano medio | Lento | Regular | Uniformemente Fresco | Franco limosos arenoso | Presencia solo en profundidad de 0-5% |
| 2 | Plano alto | Moderada | Bueno | No uniformemente Fresco | Franco limoso | Presencia solo en profundidad de 5-10% |
| 3 | | Moderada rápida | | Uniformemente húmedo | | Presencia en todo el perfil |
| 4 | | Rápida | | | | |

Posteriormente se trabajó en la construcción de modelos predictivos del IS en relación a las variables de mayor capacidad de predicción del crecimiento, mediante regresión lineal múltiple.

La validación de los modelos se realizó utilizando el método *Leave one out* o *jackknife*. Se utilizó como medida del error y de sesgo, el error cuadrático medio de predicción (ECMP) y el coeficiente de variación que refleja la variabilidad de la estimación del modelo.

3.2.4 Análisis de la relación entre la calidad de vainas con la calidad del sitio

Para evaluar la calidad nutritiva de las vainas se obtuvieron valores promedios a partir de estadística descriptiva de cada uno de los parámetros: humedad, proteínas, hidratos de carbono, lípidos, cenizas y fibra dietaría total. Posteriormente se relacionaron los mismos en función de las clases de calidad de sitio determinadas en el ítem anterior y algunas variables propias del rodal, entre ellas, densidad y edad de cosecha. Mediante el uso de análisis multivariado se correlacionaron dichas características. A modo de análisis exploratorio a

través de análisis discriminante y posteriormente análisis de varianza multivariado se compararon los resultados entre clases. Se determinaron las principales correlaciones entre variables que permitieran definir si la capacidad productiva de un sitio expresado a partir del IS tendría influencia en la calidad nutricional de las vainas. Se excluyeron del análisis final los parámetros humedad y cenizas, por considerarse que la información a aportar sería escasa en cuanto a la calidad nutricional de las vainas para uso alimenticio.

3.2.5 Crecimiento y producción

El estudio del crecimiento se realizó bajo dos enfoques, el del crecimiento del árbol individual, que consideró al crecimiento en los árboles como la elongación y engrosamiento del fuste, ramas que implica entonces cambios en el tamaño (e.g. peso, volumen), en la forma del fuste y de otros componentes; el segundo enfoque fue sobre el crecimiento de los rodales, en las variables peso y volumen por unidad de superficie (hectárea) a través del tiempo (Cancino, 2006).

A nivel de árbol individual: Se trabajó con el análisis del fuste, que consistió en el conteo y medición de anillos de crecimiento en secciones transversales del fuste del árbol apeado, a diferentes alturas sobre el suelo, a partir del cual se determinaron los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \text{Diámetro (cm)} \quad d &= \text{espesor del anillo}_i \times 2 \\ \text{Sección transversal (cm}^2\text{)} \quad S &= (\pi \times \text{diámetro}^2)/4 \end{aligned}$$

Para el cálculo del volumen se empleó la fórmula de Smalian (Prodan et al., 1997) y se corrigió con el coeficiente mórfico con un valor de 0,8 usado por Kees et al. (2018) en plantaciones de *Prosopis alba*.

$$\text{Volumen de fuste (VF)} = \Sigma \text{ del volumen de las secciones (m}^3\text{)} = (S_1 + S_2)/2 \times L \times 0,8$$

S_1 = sección transversal inferior de la troza, S_2 = sección transversal superior de la troza y L = longitud de la troza

Para evaluar la relación HT y DAP, se consideró la altura dominante de Assman:

$$Hd(m) = H \text{ media } 100 \text{ árboles más gruesos / ha}$$

Incrementos de crecimiento: Incremento acumulado (IA), incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA) para las variables d y VF.

- *Incremento acumulado (IA)*: expresa el crecimiento acumulado en relación al tiempo
- *Incremento corriente anual (ICA)*: expresa el crecimiento en el año de medición

$$ICA = d_i - d_{i-1}$$

$$ICA = VF_i - VF_{i-1}$$

- *Incremento medio anual (IMA)*: expresa el promedio de crecimiento anual del árbol.

$$IMA = d_i / i$$

$$IMA = VF_i / i$$

Donde:

d_i = diámetro en el año i; d_{i-1} = diámetro en el año anterior a i

VF_i = volumen de fuste en el año i, VF_{i-1} = volumen de fuste en el año anterior a i

A nivel de rodal: Con el registro de datos en las parcelas durante el período de crecimiento 2004-2016 se calcularon los siguientes parámetros.

Área basal en m^2/ha (AB): representa la sumatoria de las secciones a 130 cm de altura de todos los árboles de cada parcela relacionado a la superficie en hectáreas para cada densidad de plantación.

$$AB = \sum_{i=1}^c g_i$$

$$g_i = (\pi \times d_i^2) / 4$$

Donde:

g_i = sección transversal en (m^2) de un árbol de DAP d_i

Diámetro medio cuadrático en cm (Dg): representa el diámetro equivalente al árbol de área basal media estimado a partir del área basal y del número de pies. Resulta más apropiado el uso del Dg para la descripción de las masas forestales porque representa directamente el nivel de ocupación de espacio, en lugar del diámetro promedio aritmético, cuya significación en biomasa es menos directa (Corvalán y Hernández, 2006).

$$Dg = \sqrt{40000 \times (AB / N) / \pi}$$

Donde:

AB= área basal y N = número de pies por ha.

Alturas en metros: Para determinar la relación HT/DAP de la masa se emplearon los pares de datos individuales. Para la descripción de las características de las parcelas se registró la altura media del rodal (H_m).

Estimación de modelos de crecimiento

En la estimación de los modelos de crecimiento en volumen se trabajó con datos provenientes de análisis de fuste empleando la técnica de suavizado a las series individuales, con el objetivo de suavizar las series de anchos de anillo, aplicando la opción por defecto que InfoStat (2018) utiliza como suavizado a la regresión localmente ponderada (LOWESS) (Cleveland, 1979). En la estimación del modelo para curvas de HT-DAP generalizadas se emplearon los datos provenientes de rodales.

Modelo de ICA e IMA en volumen de fuste

Para modelar la relación de los incrementos en volumen en función de la edad se trabajó con modelos de regresión no lineal con árboles dominantes, sin discriminar por calidad de sitio, ya que no se contó con igual cantidad de individuos por clase. Cabe aclarar que para el ajuste en la regresión se extrajeron 2 individuos de clase III, considerando que el crecimiento de los árboles de esta clase al ser demasiado bajo no cumpliría con un objetivo productivo. Debido a la naturaleza de los datos, provenientes de medición de anillos de crecimiento, se estimó a partir del diagnóstico del análisis de residuos, la presencia de heterocedasticidad y/o falta de independencia en los errores, ante esta situación se emplearon modelos mixtos, que permitieron modelar la estructura de la matriz de la varianza y covarianza de los residuos.

Se usaron distintos modelos y la selección se hizo empleando el criterio de información de Akaike (AIC); el criterio bayesiano de información de Schwartz (BIC) y el error estándar en los parámetros. En la modelación del IMA e ICA se consideró entre los efectos fijos la edad del individuo, modelando la correlación y la varianza de los errores con diferentes funciones.

Modelo de altura total del rodal en relación al DAP

Para la obtención de la curva HT-DAP, se registraron las alturas totales, los diámetros de los árboles en las parcelas medidas y se ajustaron los pares de datos mediante regresión con un modelo lineal mixto de una función polinómica de segundo grado modelando la heterocedasticidad presente en los residuos con la función *var ident*. Al igual que en el ítem anterior, la selección del modelo se hizo empleando el criterio de información de Akaike (AIC); el criterio bayesiano de información de Schwartz (BIC), el error estándar en los parámetros y el coeficiente de regresión. Para la validación se utilizó como medida del error y de sesgo, la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la diferencia agregada (DIFA) respectivamente.

$$RECM = \sqrt{\sum(o-e)^2 / n}$$

$$DIFA = \sum(o-e) / n$$

Donde:

o = valores observados

e =valores esperados

n =muestra

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Índice de sitio

4.1.1 Determinación del criterio de altura dominante

Según los resultados del cálculo de la Hd por los criterios de Assman y de los desvíos ($d_m + 2\sigma$), se percibe una leve diferencia en los valores de salida de la Hd entre ellos (Tabla 4).

La mayor parte de los casos resultaron valores iguales o mayores para la definición de Assman. La aplicación del criterio de los desvíos ($d_m + 2\sigma$) resultó ser demasiado exigente, al punto de no conseguir árboles en varias de las parcelas de estudio que cumplieran con la dimensión necesaria de diámetro. Al momento de la elección del criterio, el de Assman demostró mayor flexibilidad en su aplicación, seleccionándose este criterio como el más apropiado para este tipo de rodales que presentan alta variabilidad en el crecimiento en diámetro, ya sea por características intrínsecas de la especie, falta de manejo y/o variabilidad genética presente.

TABLA 4: Comparación de la altura dominante mediante dos criterios: altura de Assman, (media de los 100 árboles más gruesos por hectárea) y altura dominante de todos los árboles mayores que el diámetro medio sumado dos desviaciones estándar ($dm + 2\sigma$).

| Edad del rodal | Criterio para la definición de Hd | | CV % |
|----------------|-----------------------------------|--------|------|
| | X+ 2 desv | Assman | |
| 4 | 3,9 | 3,9 | 24 |
| 8 | 7,2 | 7,6 | 29,1 |
| 9 | 9,1 | 8,9 | 28,4 |
| 10 | 7,4 | 7,8 | 31,2 |
| 11 | 7,1 | 7,1 | 47,5 |
| 12 | 9,3 | 9,5 | 25,8 |
| 13 | 7 | 6,9 | 33,8 |
| 14 | 9,6 | 9,8 | 32,2 |
| 15 | 9,2 | 9,4 | 26 |
| 16 | 7,2 | 7,1 | 28 |
| 20 | 8,5 | 8,7 | 22,5 |

4.1.2 Altura dominante

Los valores obtenidos indicaron que la Hd crece con la edad, a un ritmo mayor en la etapa inicial de la vida del rodal que en la madurez y se registraron menores variabilidades en los rodales de mayor edad (Tabla 4).

De la evolución de la Hd en función de la edad, presentado en el punto 4.1.3 se definen tres etapas de crecimiento, una etapa inicial o juvenil del rodal, que se estableció hasta los 8 años, donde hay una marcada aceleración del incremento de la Hd, luego una etapa de edades intermedias, entre los 8 a los 15 años donde el incremento disminuye y una etapa final, en la cual el rodal alcanza la altura final (mayor a 15 años) (Tabla 5).

TABLA 5. Altura dominante promedio (Hd) y variabilidad en relación a la edad de los rodales (DE, mínimo y máximo), definida por rangos de edades tempranas (de 1 a 7,9 años), edades medias (de 8 a 15 años) y edades avanzadas (más de 15 años)

| Edad(años) | Observaciones | Hd(m) | DE | Mínimo | Máximo |
|------------|---------------|-------|-----|--------|--------|
| 1 a 7,9 | 47 | 2,6 | 1,6 | 1,0 | 7,7 |
| 8 a 15 | 33 | 7,1 | 1,6 | 3,5 | 9,8 |
| > 15 | 11 | 8,7 | 1,1 | 7,1 | 10,5 |

La variabilidad de la Hd fue mayor en los rodales en la primera y segunda etapa de crecimiento, disminuyendo a partir de la tercer etapa (DE=1,6 <15 años y 1,1>15 años) (Tabla 5). En concordancia con lo expresado por Herrera y Alvarado (1998), la mayor variabilidad que se presenta a edades tempranas responde al comportamiento de las masas influenciadas por diversos factores como la variabilidad genética, técnicas de plantación y densidad inicial.

4.1.3 Modelación de las curvas de crecimiento en altura dominante y determinación del Índice de sitio

Se dispusieron de 100 pares de datos altura-edad, incluyendo datos del análisis de fuste de 13 árboles muestras en el análisis de crecimiento en altura. El análisis visual de la dispersión de los datos, reflejó un patrón anamórfico, en función de ello se optó por la construcción de curvas anamórficas a partir de la curva guía.

La dispersión de los datos de altura dominante-edad refleja una tendencia de carácter anamórfico sobre una muestra de árboles que se encuentra en un rango de alturas entre 4 a 10 metros (FIGURA 6), coincidiendo con las máximas alturas registradas para la especie en bosques nativos, en un rango de 10 a 12 metros en edades avanzadas de 90 a 100 años, citadas por diversos autores (Juárez de Galíndez et al, 2005; Cisneros y Moglia, 2017).

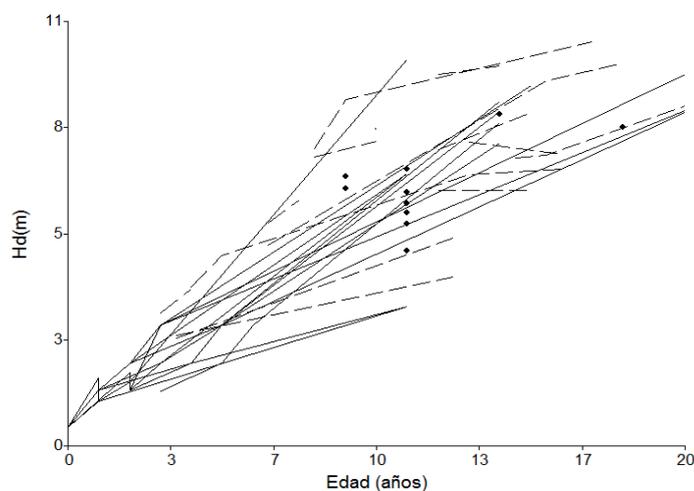


FIGURA 6 Series de datos de altura dominante-edad de árboles provenientes de parcelas temporales (puntos), parcelas permanentes y de intervalo (línea entrecortada) y análisis de fuste (línea continua).

La determinación de la edad base puede ser arbitraria y elegida a conveniencia (Thrower, 1989), uno de los criterios usados por algunos autores ha sido la longevidad de la especie (Thrower, 1986). En este estudio, según las características de la especie y el comportamiento de los datos, se definió la edad base en 15 años, considerando que a esa edad el potencial del sitio ya se ha expresado y que la misma responde aproximadamente a la mitad del turno. Si bien hay escasos estudios en *Prosopis alba* que hayan definido este valor, Kees et al. (2017) propone 17 años y Pérez et al. (2011) propone 15 años para la especie. En concordancia con Ortega y Montero (1988) se define la edad base considerando como uno de los criterios que esta se encuentre próxima a la mitad del turno.

Las curvas de las alturas dominantes (H_d) ajustadas con los modelos estadísticos clásicos, i.e., distribución independiente, normal y homogénea de los errores, presentaron diferencias entre ellos (FIGURA 7a). El modelo polinómico se separa marcadamente del comportamiento general de las curvas restantes, describiendo un crecimiento muy alejado de los datos observados. Las demás curvas se diferencian, en un rango estrecho (<1 m), si se analiza la etapa juvenil del rodal (<8 años) y la adulta (>15 años). El modelo Gompertz, con un posicionamiento intermedio (en gráfico línea llena) con respecto a los demás modelos describe un crecimiento con ritmo ascendente, para luego decrecer progresivamente y tener un comportamiento asintótico a partir de los 15 años aproximadamente.

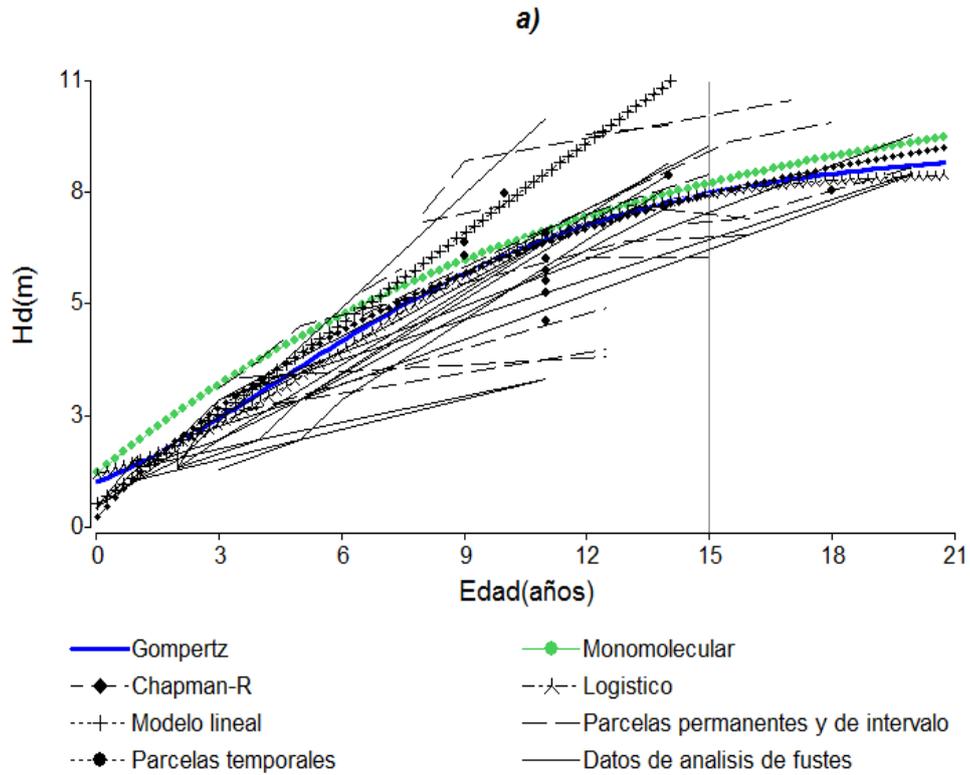


FIGURA 7a Curvas de crecimiento medido a través de la altura dominante (Hd) en función de la edad, contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes, de intervalo, datos de parcelas temporales y análisis de fuste. Modelo lineal polinómico y modelos no lineales clásicos.

Sin embargo, cuando se analizó la correlación debido a las mediciones repetidas en el tiempo, los modelos mostraron comportamientos diferentes en sus ajustes a partir de edades intermedias hacia la adultez (Figura 7b).

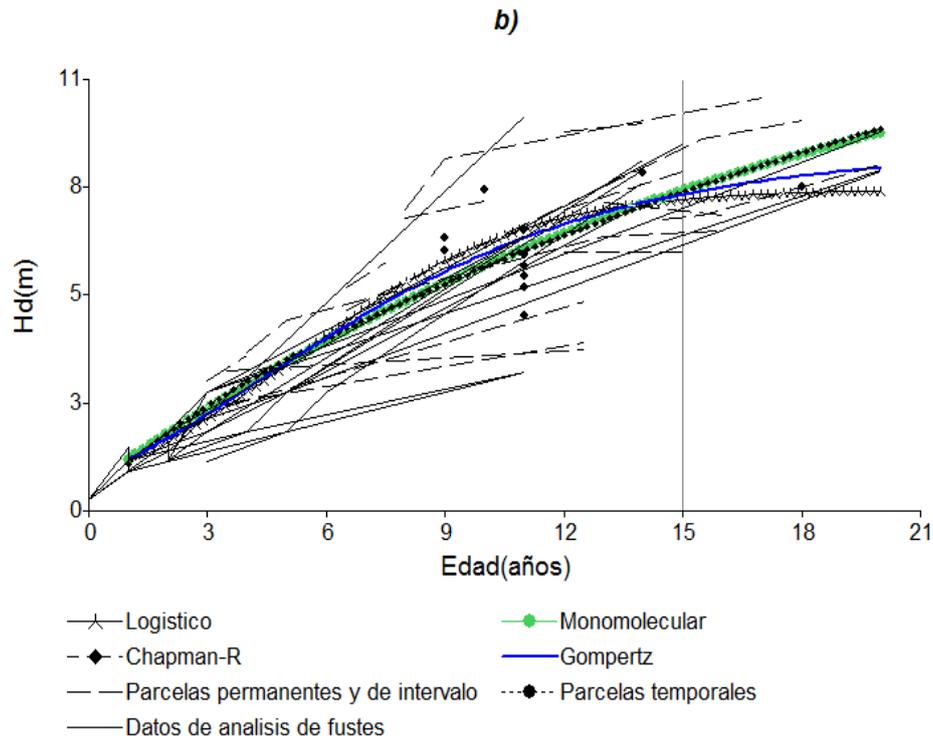


FIGURA 7b. Curvas de crecimiento medido a través de la altura dominante (Hd) en función de la edad, contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes, de intervalo, datos de parcelas temporales y análisis de fuste. Modelos no lineales mixtos.

En las curvas de crecimiento ajustada con modelos no lineales mixtos, la mayor diferencia se presenta entre los modelos de Chapman-Richards y monomolecular (similares entre sí) con el modelo Logístico. Durante el periodo entre los 8 a 15 años aproximadamente, las curvas describen un crecimiento sostenido con diferencias en la pendiente de hasta 1 metro entre ellas. El modelo logístico presenta mayor ritmo de crecimiento y se aproxima a los valores máximos de altura a partir de los 14 años aproximadamente, siendo en esta instancia superado por los demás modelos, y sobrepasado ampliamente por el modelo Chapman-Richards y monomolecular. En esta etapa la diferencia entre los modelos es mayor a 1 metro. La causa de esta sobreestimación de la altura máxima que puede alcanzar un rodal, puede deberse a la menor cantidad de datos en edades superiores, siendo más afectada la falta de potencia de los modelos citados. En resumen todos los modelos tienden a sobreestimar la altura a edades tempranas (menores a 7 años), sin embargo a edades intermedias (mayores a 7 años) disminuye este comportamiento. El modelo de Gompertz presentó un posicionamiento intermedio con respecto a los demás modelos, con una asíntota a partir de los 15 años, por lo que se consideró que el mismo muestra una correcta

representación biológica ya que la especie no registró alturas superiores a 10 metros en plantaciones de más de 15 años y en bosques nativos se registran valores levemente superiores a edades avanzadas.

De todos los modelos, el modelo Gompertz ajustado bajo los supuestos de errores independientes y varianzas homogéneas (Modelo 3) presentó valores de los parámetros estimados y sus errores estándares muy próximos a los valores del mismo modelo asumiendo varianzas heterogéneas y ajustando las mismas con una función de varianza exponencial (Modelo7) (Tabla 6). Si comparamos estos dos modelos, se observa un comportamiento similar a partir de los parámetros estimados, con errores estándar levemente menores en el modelo 7. Los demás modelos presentan mayores variaciones en sus parámetros y errores según se trate de modelos de efectos fijos o mixtos (Tabla 6).

TABLA 6: Parámetros estimados y sus errores estándar para cada uno de los 9 modelos ajustados de curva de crecimiento en altura dominante en función de la edad de los árboles de algarrobo en la región chaqueña semiárida.

| Modelos ajustados | | α | | | β | | | γ | | |
|--------------------------|---|----------------------------|---|------------|---------------------------|---|-------------|----------------------------|---|-------------------|
| 1 | Modelo lineal | 0,3 | ± | 0,3 | 0,7 | ± | 0,08 | -0,02 | ± | 3,2 |
| | | | | | | | | | | x10 ⁻³ |
| 2 | Chapman-Richards | 11,2 | ± | 1,9 | 0,08 | ± | 0,04 | 0,9 | ± | 0,17 |
| 3 | Gompertz | 9,3 | ± | 0,6 | 2,3 | ± | 0,2 | 0,1 | ± | 0,03 |
| 4 | Monomolecular | 11,5 | ± | 1,6 | 0,9 | ± | 0,03 | 0,08 | ± | 0,02 |
| 5 | Logístico | 8,7 | ± | 0,4 | 6,2 | ± | 0,5 | 3,3 | ± | 0,4 |
| 6 | Chapman-Richards (Correlación Simetría compuesta y función de varianza exponencial) | 23,6 | ± | 28 | 0,02 | ± | 0,04 | 0,7 | ± | 0,09 |
| 7 | Gompertz (Correlación simetría compuesta y función de varianza exponencial) | 9,1 | ± | 0,5 | 2,3 | ± | 0,07 | 0,2 | ± | 0,02 |
| 8 | Monomolecular (correlación Simetría Compuesta y función de varianza power) | 14,6 | ± | 3,11 | 0,9 | ± | 0,01 | 0,05 | ± | 0,02 |
| 9 | Logístico (Correlación simetría compuesta y función de varianza power). | 8,1 | ± | 0,3 | 5,5 | ± | 0,37 | 2,7 | ± | 0,2 |

TABLA 7: Criterios de bondad de ajuste de los modelos lineal y no lineal de efectos fijos

| N° | Modelos | Modelo de Regresión Lineal | | |
|--|--|----------------------------|-------|------|
| | | AIC | BIC | ECMP |
| 1 | Polinomio 2° grado Hd= $\alpha + \beta x + \delta x^2$ | 305 | 315 | 1,32 |
| Modelo de Regresión no Lineal clásica | | | | |
| 2 | Chapman-Richards Hd= $\alpha*(1-\exp(-\beta*E))^{\delta}$ | 288,0 | 298,0 | 1,32 |
| 3 | Gompertz Hd= $\alpha*\exp(-\beta*\exp(-\delta*E))$ | 288,6 | 298,6 | 1,32 |
| 4 | Monomolecular Hd= $\alpha*(1-\beta*\exp(-\delta/E))$ | 288,7 | 298,8 | 1,34 |
| 5 | Logística Hd= $\alpha / 1 + \exp(-(E-\beta)/\delta)$ | 291,5 | 301,5 | 1,36 |

Los mejores ajustes se obtienen con el modelo Gompertz y Chapman Richards, ajustados con efectos fijos (modelo clásico) (Tabla 7). Cuando se incorpora el efecto de modelar la correlación y las varianza heterogénea el modelo de mejor ajuste es Gompertz, reportando una varianza residual menor a los demás (Tabla 8).

TABLA 8: Criterios de bondad de ajuste de los modelos no lineales mixtos

| N° | Modelos | Estructura de correlación y varianza de los errores | Modelo de Regresión no Lineal mixto | | |
|----|--|---|-------------------------------------|------------|---------------|
| | | | AIC | BIC | Var. residual |
| 6 | Chapman-Richards Hd= $\alpha*(1-\exp(-\beta*E))^{\delta}$ | Correlación simetría compuesta y función de varianza exponencial (varexp) | 256 | 271 | 0,15 |
| 7 | Gompertz Hd= $\alpha*\exp(-\beta*\exp(-\delta*E))$ | Correlación simetría compuesta y función de varianza (Var exp) | 231 | 246 | 0,04 |
| 8 | Monomolecular Hd= $\alpha*(1-\beta*\exp(-\delta/E))$ | Correlación simetría compuesta y función de varianza power | 237 | 252 | 0,04 |
| 9 | Logística Hd= $\alpha / 1 + \exp(-(E-\beta)/\delta)$ | Correlación simetría compuesta y función de varianza (Varpower) | 233,6 | 248,5 | 0,04 |

El análisis de los residuos indica que en la mayoría de los modelos la falta de homogeneidad fue corregida con el modelo mixto (FIGURA 8). Es notable la presencia de

un patrón en los residuos, que como en la mayoría de los modelos clásicos indicaron la presencia de heterocedasticidad, con valores significativos mediante la prueba de Levene. Esto ya fue observado por Carrero et al. (2008), quienes afirman que los modelos de crecimiento en altura se caracterizan por un incremento de las varianzas de los errores con la edad, generando deficiencias en la precisión y capacidad de predicción de los modelos ajustados bajo los supuestos clásicos.

Existen numerosos trabajos donde se han realizado estudios de calidad de sitio, usando modelos lineales y no lineales que cumplen con los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de errores. En Brasil, Ribeiro et al. (2016) evaluaron modelos de crecimiento en altura dominante comparando modelos dinámicos invariantes con la edad de referencia y modelos estáticos como es el método de la curva guía en la especie *Khaya ivorensis*, concluyendo que este último método fue más eficiente para la clasificación de sitios. Crechi et al. (2011) realizaron un estudio de Índice de Sitio en *Eucalyptus grandis* y Kees et al. (2017) determinaron el Índice de Sitio para *Prosopis alba* en Chaco, en todos los casos mediante modelos generales donde asume el cumplimiento de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los errores. Kees et al (2017) empleó el modelo de Gompertz con el cual generó el mejor ajuste en la determinación de la curva guía, obteniendo un error cuadrático medio en el ajuste de 1,01. En contraposición a los resultados de Kees et al (2017) sobre *Prosopis alba*, las medidas de ajuste analizadas en este estudio mostraron mayor precisión para los modelos no lineales mixtos con 0,04 de varianza residual, donde se pudo modelar la correlación que se genera en las medidas repetidas sobre un mismo individuo y corregir la heterocedasticidad.

El modelo con mejor ajuste para obtener la curva guía fue el Modelo de Regresión no Lineal mixto de Gompertz, con correlación por simetría compuesta y varianza de los errores con función de varianza exponencial, acorde a los resultados obtenidos por Jerez-Rico et al. (2011), que concluyen que el mejor ajuste para la estimación del IS en Teca (*Tectona grandis* L. F.) se dio con modelos no lineales mixtos respecto a los modelos clásicos en términos de sesgo y precisión.

La función seleccionada es la siguiente:

$$HD = \alpha \cdot e^{(-\beta \cdot e^{(-\gamma \cdot E)})} [1]$$

Hd= Altura dominante

E= edad (años)

α, β, γ = parámetros estimados

| | Valor | Error estándar | p-valor |
|--------------|-------|----------------|---------|
| alfa | 9,1 | 0,5 | <0,0001 |
| beta | 2,3 | 0,07 | <0,0001 |
| gamma | 0,2 | 0,02 | <0,0001 |

$$HD = 9,1 \cdot e^{(-2,3 \cdot e^{(-0,2 \cdot E)})} [2]$$

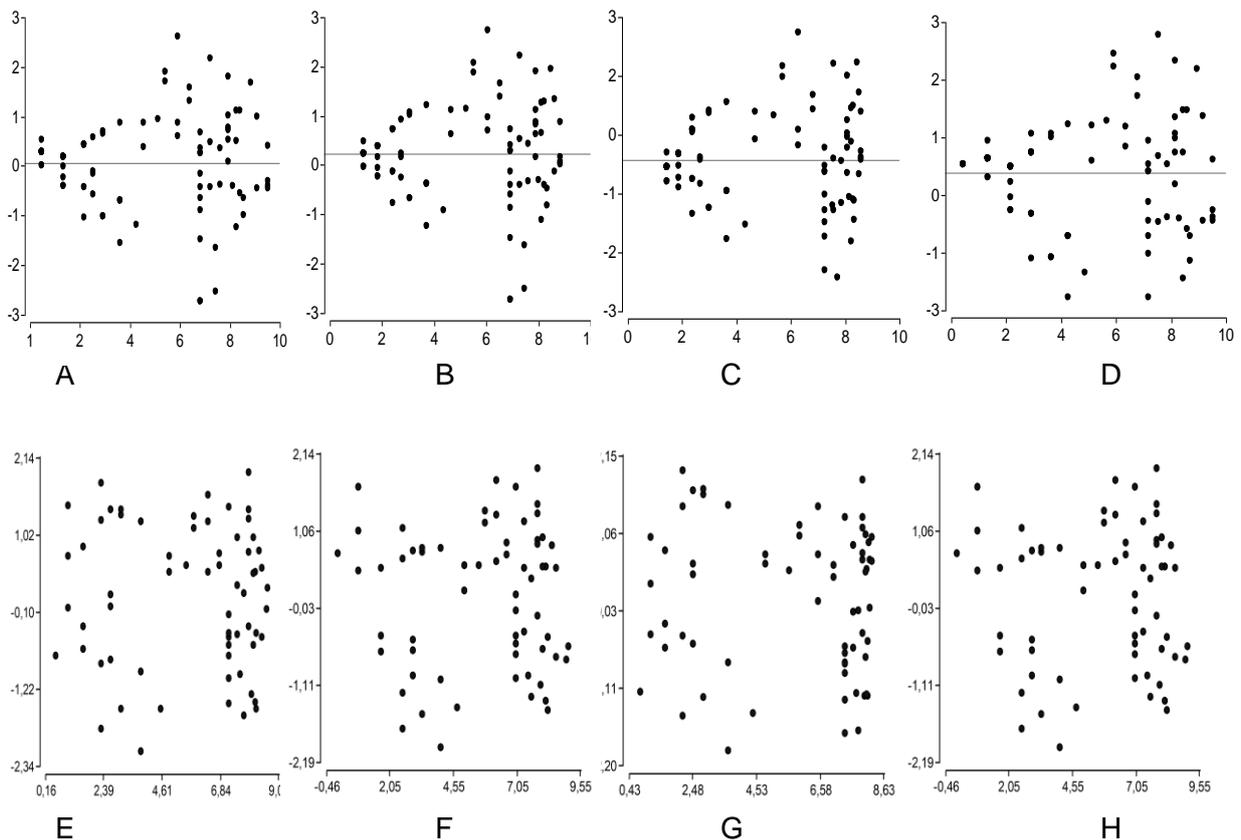


FIGURA 8. Residuos estudentizados vs. predichos (arriba) modelos no lineales clásicos: Modelo Gompertz (A), Modelo Logístico (B), Modelo Chapman-R (C), Modelo monomolecular (D) y (abajo) modelos no lineales mixtos con corrección por correlación y heterocedasticidad : Modelo Gompertz (E), Modelo Logístico (F), Modelo Chapman (G) y Modelo monomolecular (H).

A partir de la ecuación [1] y los parámetros obtenidos en ecuación [2], se grafica la curva guía que establece un IS de 8,2 metros a los 15 años (FIGURA 9). A partir de la ecuación [2] se puede derivar la función que permite expresar la familia de curvas anamórficas que cubren el espacio de crecimiento en altura dominante.

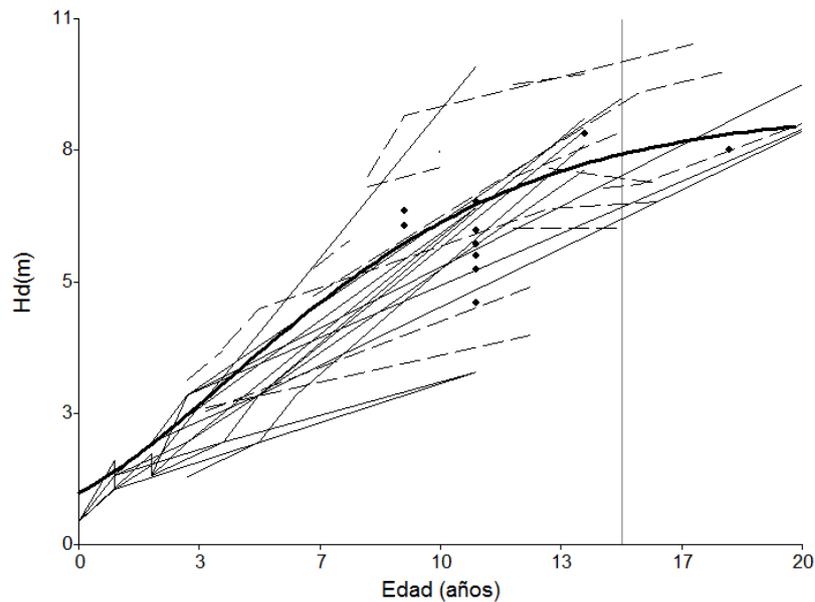


FIGURA 9. Determinación de la curva guía. La curva de crecimiento fue contrastada con series longitudinales de parcelas permanentes y de intervalo (línea entrecortada), análisis de fustes (línea continua) y datos de parcelas temporales (puntos).

Los intervalos de confianza (IC) y de predicción fueron graficados como bandas de confianza y bandas de predicción (FIGURA 10) para evaluar el ajuste del modelo Gompertz. El IC nos indica los valores que pueden esperarse para la media estimada con una confianza del 95%. Se observa que para las edades más pequeñas los valores tienen menor dispersión que para árboles de mayores edades (FIGURA 10). Sin embargo, la variabilidad que se observa puede atribuirse a la calidad de sitio. Es importante destacar que se graficaron las bandas de predicción para los valores observados, donde los puntos representan las observaciones que se encuentran incluidas en estas bandas con un 95% de confianza.

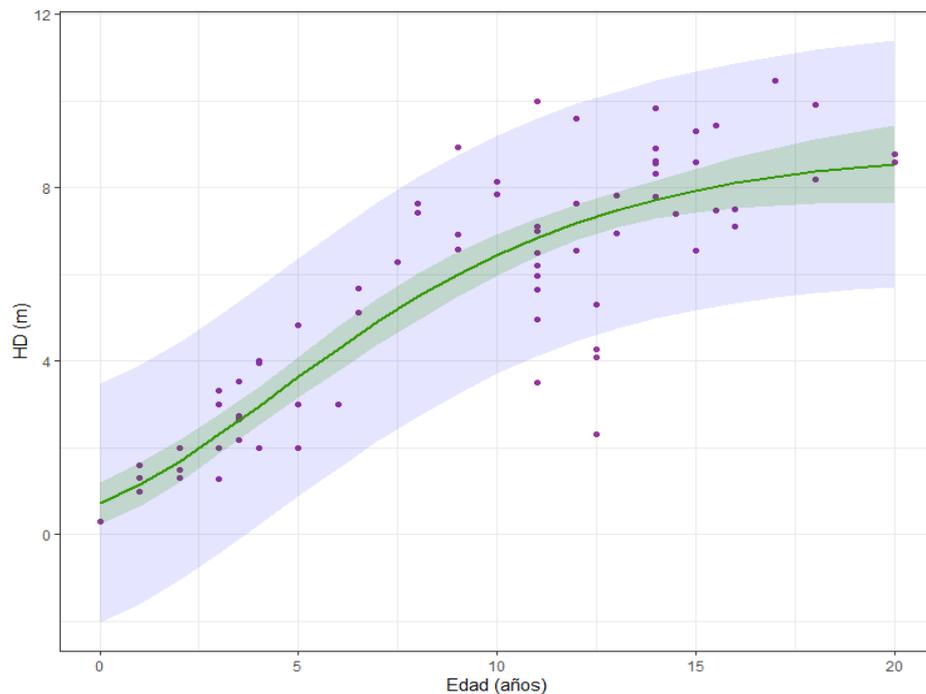


FIGURA 10. Curva armonizada con una función Gompertz y sus bandas de confianza (celeste oscura) y bandas de predicción (celeste claro).

La ecuación armonizada es:

$$HD = IS \cdot e^{(-\beta \cdot e^{(-\gamma \cdot E)})} / e^{(-\beta \cdot e^{(-\gamma \cdot 15)})} [3]$$

Se obtuvo la familia de curvas anamórficas, despejando α (asíntota) en la ecuación de Índice de Sitio sustituyendo la expresión resultante en la ecuación original, se consideró que los parámetros de forma y pendiente son comunes para todos los sitios. Se genera la familia de curvas anamórficas haciendo variar la *Edad*, el *IS* deseado para la E_b predeterminada coincidiendo con el procedimiento empleado por Barrero et al. (2011) y Hernández-Ramos et al. (2014). A partir de la curva guía se establecieron 3 clases de calidad de sitio y los rangos de Hd se definieron de la siguiente forma: Clase I, correspondiente a una calidad de sitio superior con un rango de $11,2 \geq IS \geq 9,2$ siendo el IS que caracteriza esta clase 10,2, Clase II, correspondiente a una calidad de sitio intermedia con $9,2 > IS \geq 7,2$ siendo el IS que caracteriza esta clase 8,2, Clase III, que se corresponde con una calidad de sitio pobre con $7,2 > IS \geq 5,2$ siendo el IS que caracteriza esta clase 6,2. En base a la dispersión de los datos de altura dominante obtenidos a la edad base se estableció la equidistancia entre las curvas

de 2 metros, determinándose de esta manera la familia de curvas anamórficas y los rangos de cada clase (FIGURA 11).

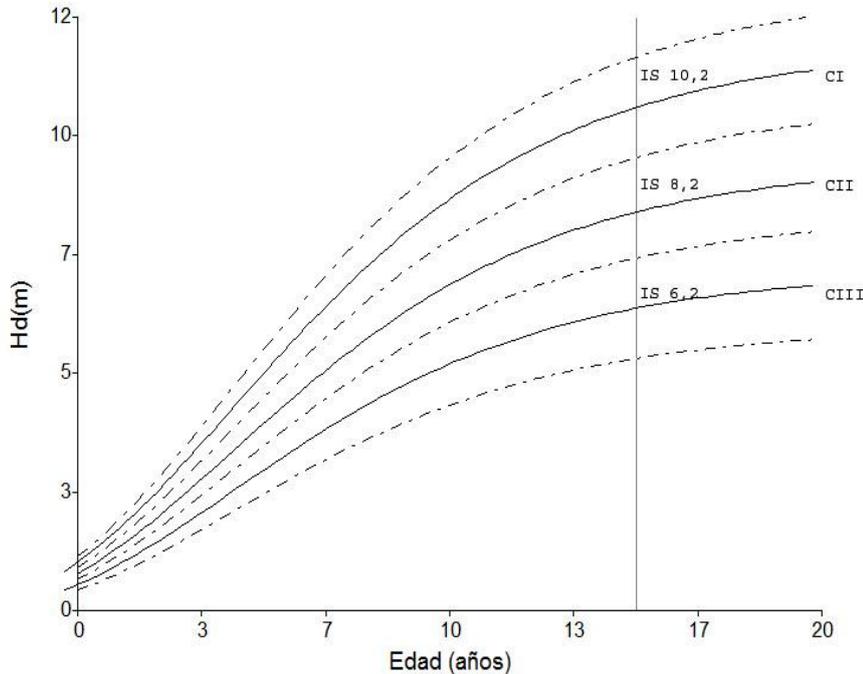


FIGURA 11. Familia de curvas anamórficas (líneas continuas) con la delimitación de los rangos de Hd (líneas entrecortadas) para cada clase de sitio que ha sido indicada con números romanos. Se muestra cada IS a la edad base de 15 años.

Al comparar las curvas de crecimiento en altura con los datos de crecimiento de los árboles de la muestra en cada uno de los rangos establecidos para las clases, se observa que la mayor parte de los casos se representan adecuadamente. Se verifica que existe solapamiento de datos de la clase I con la clase II en algunas series de datos a edades tempranas (FIGURA 12a). Esta situación se repite en la clase II a iguales edades, con la clase III (FIGURA 12b). Para la muestra observada de la clase III, no existen solapamientos con otras clases, aunque se observan algunos individuos con muy bajas alturas dominantes que quedarían fuera del rango de esta clase. (FIGURA 12c).

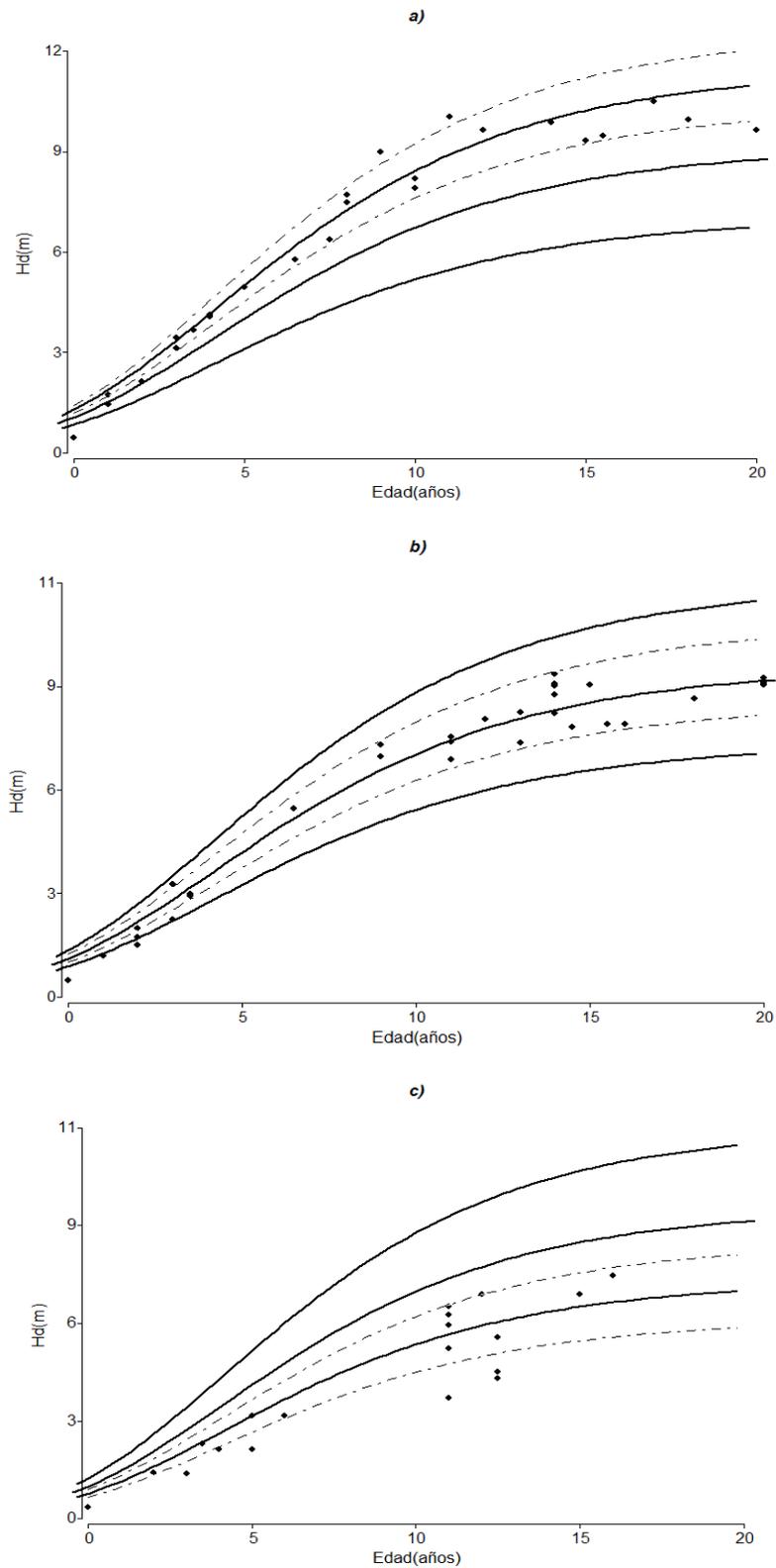


FIGURA 12. Familia de curvas anamórficas contrastadas con los arboles correspondientes a cada clase. En a) a la clase I, en b) a la clase II y en c) a la clase III.

El error de estimación resultante de la aplicación del modelo indica que en cada una de las clases de calidad a edades tempranas, se pueden presentar valores extremos de hasta 2 metros en la clase I, decreciendo el sesgo de la estimación a edades intermedias para las 3 clases. El rango de error es de 0 a 1,3 m a partir de los 10 años (FIGURA 13). La clase III a partir de la misma edad muestra un sesgo con una tendencia a sobrestimar el IS con un rango menor de error. En general se puede concluir que el error estaría en un rango del 5 al 10 % en concordancia con estudios realizados sobre otras especies. Ribeiro et al. (2016) evaluaron la precisión de los modelos de Índice de Sitio como satisfactoria con valores similares que no supera el 10 % RECM.

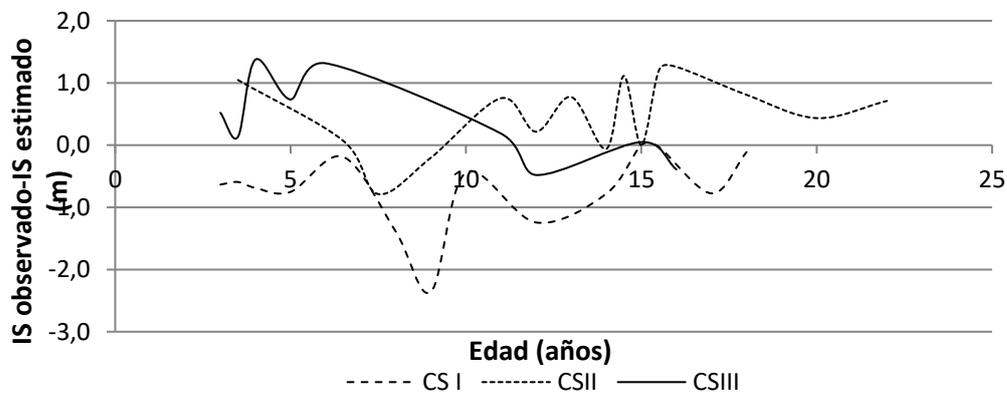


FIGURA 13: Error de estimación del modelo de predicción de IS para cada clase de calidad en función de la edad.

4.2 Clases de calidad de sitio en relación a factores edafoclimáticos

4.2.1 Clases de calidad por parcela

Se registraron los valores promedios de altura dominante según clase de calidad e IS con diferencias altamente significativas entre clases en la Hd (valor de F 19,5 $p < 0,0001$) e IS (valor de F 53,95 $p < 0,0001$) (Tabla 9).

TABLA 9: Análisis de la varianza para las variables Índice de Sitio (IS) y Altura Dominante (Hd) según clases de calidad

| Clases | Hd(m) | EE | IS | |
|--------|-------|------|-----|---|
| I | 8,7 | 0,32 | 9,9 | A |
| II | 7,6 | 0,22 | 8,1 | B |
| III | 5,5 | 0,42 | 6 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los valores obtenidos en el análisis confirman que se encuentran correctamente representadas las tres calidades como resultado del crecimiento en altura de los rodales en estudio. La muestra de 47 observaciones evaluadas resultaron clasificadas en 26,6% en la mejor calidad de sitio (calidad I), 55,5% en la calidad regular (calidad II) y 17,7% en la menor calidad (calidad III).

4.2.2 Factores climáticos

En relación a los datos registrados en las estaciones meteorológicas se obtuvieron los siguientes valores promedios en temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial para el periodo 1995-2017 en la Estación meteorológica La Abrita y 1991-2010 en la Estación meteorológica Aeropuerto (Tabla 10).

TABLA 10: Valores promedios de temperatura, precipitación y relación de evapotranspiración potencial de las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

| Estación meteorológica | Temperatura media anual (°C) | Precipitación media anual(mm) | Evapotranspiración potencial |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| La Abrita | 20,6 | 539 | 2,2 |
| Aeropuerto | 20,4 | 650 | 1,8 |
| Promedio | 20,5 | 595 | |

En función de los valores promedios obtenidos (Tabla 10), se registra una temperatura promedio mensual de 20,5°C y precipitación promedio anual de 595 mm. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos previstos por Derguy et al. (2016) para la región, de 19,8°C a 24°C y de 500 a 1000 mm, respectivamente. La relación de evapotranspiración potencial esta en el rango de 1 a 4, situándose en la faja latitudinal subtropical y en el piso altitudinal basal. A partir de datos históricos para el periodo 1961-2010, la variación en la precipitación promedio anual presenta valores entre 500 a 700 mm aproximadamente, (FIGURA 14) distribuida a través del año bajo un régimen estival con temperaturas absolutas mayores a 30°C y humedad relativa promedio 60%, superándose esta media durante los meses de enero a mayo (FIGURA 15).

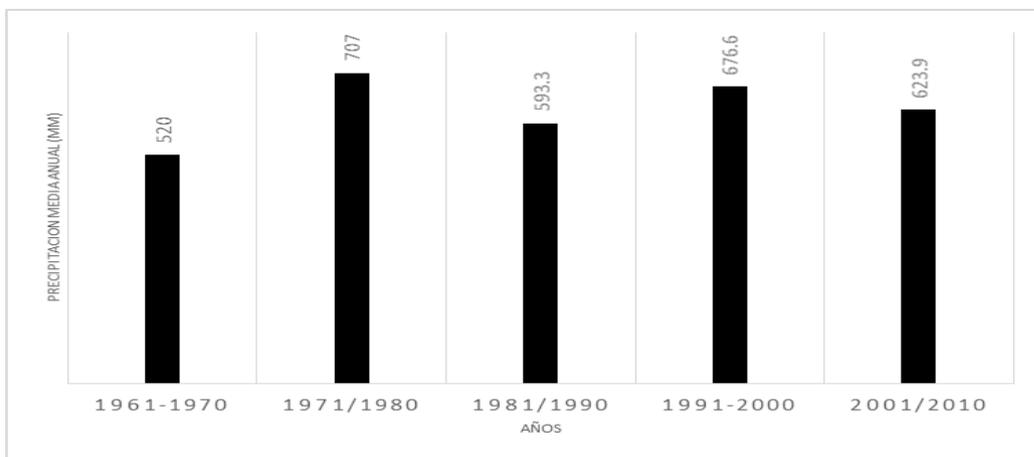


FIGURA 14: Precipitación promedio anual (mm) en el periodo de 1961-2010

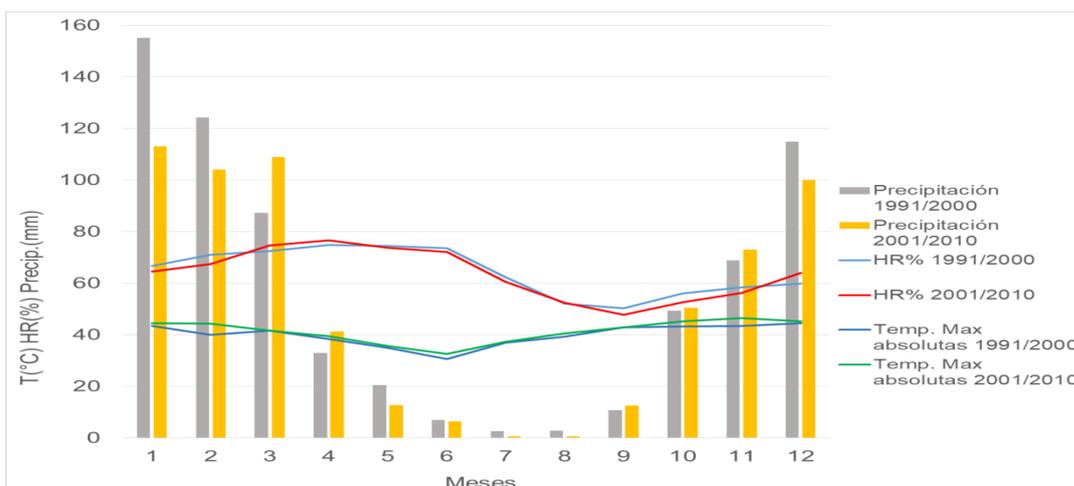


FIGURA 15: Variabilidad anual de la Precipitación, Humedad relativa promedio mensual, y temperatura máxima absoluta en el periodo 1991-2010

De acuerdo con Schlatter (1991), los factores del suelo en áreas con condiciones de clima local y sin grandes variaciones suelen ser más influyentes en el establecimiento de la especie forestal y su nivel de producción. Esto sugiere que la condición climática en la cual se ubican las plantaciones evaluadas, es homogénea y corresponde a la zona de distribución natural de la especie, no representando un factor limitante en el crecimiento.

En concordancia con lo expresado por Méndez Paiz, (2016) se puede definir al factor suelo como el más influyente de la condición del sitio y a partir de allí establecer diferencias con base en factores locales, como los fisiográficos y edáficos. Este enfoque concuerda con Villagra (2000) en cuanto al rol que desempeñan los factores del suelo en el crecimiento, quien expresa que en *P. flexuosa*, por ejemplo, el crecimiento radial estaría favorecido por primaveras lluviosas con temperaturas por debajo del valor medio. Sin embargo el porcentaje de varianza en el crecimiento explicado por las variaciones en el clima es bajo, alcanzando sólo al 29 %. El autor concluye que debido al carácter freatófito de la especie, el crecimiento podría estar más influenciado por las fluctuaciones en profundidad de la napa freática que por las variaciones interanuales en la precipitación.

4.2.3 Factores fisiográficos

Entre los factores fisiográficos relevados en el área, la pendiente es uniforme dentro de un rango de 0 a 1%, denotando en general un paisaje de planicie. Dentro de la subunidad geomorfológica, los factores como posición fisiográfica (Rel), permeabilidad (Pe) y drenaje (D) muestran cierta variabilidad entre las clases de calidad enunciadas anteriormente. El análisis de correspondencia múltiple (FIGURA 16) sugiere en el plano factorial conformado por sus dos primeros ejes (con una inercia de 62%) que la clase III se asocia a perfiles con drenaje regular y permeabilidad moderada. Las clases I y II se asocian a perfiles con mayor permeabilidad. En cuanto al relieve, en general se presenta un relieve de planicie, sin embargo dentro de la subunidad geomorfológica que se corresponde con la paleollanura de inundación del río Dulce, se observa una relación de los elementos geomorfológicos con las clases de sitio. La Clase I se asocia a un relieve de tipo plano alto o áreas de albardón hacia áreas de plano medio que representan transiciones hacia las zonas más deprimidas, llamadas plano bajo que se asocian a la clase III.

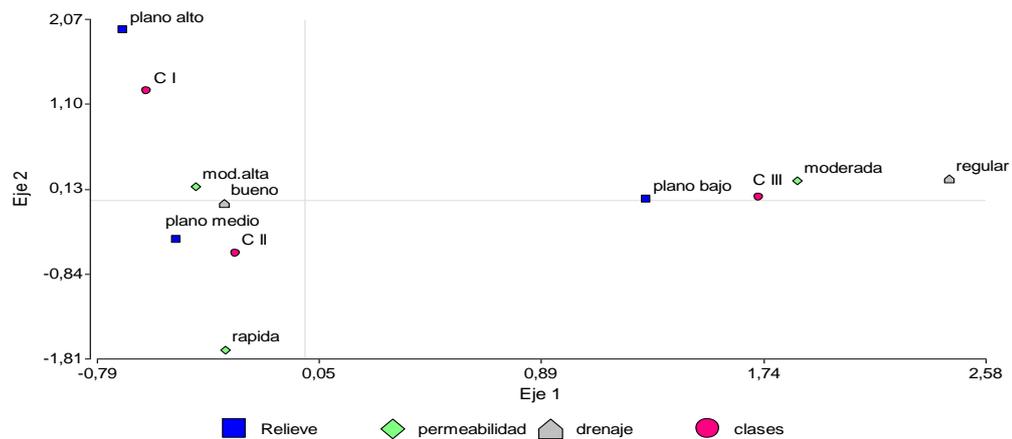


FIGURA 16: Gráfico biplot de Correspondencias Múltiples y asociación de variables fisiográficas (Relieve plano alto, medio y plano bajo; Permeabilidad moderada y rápida; Drenaje regular y bueno) con las clases de calidad de sitio (C I: Clase I, C II: Clase II y C III: Clase III)

La proporción de la inercia total explicada por los ejes se considera baja (62%), indicando que las combinaciones de variables fisiográficas estudiadas no son determinantes en la relación con las clases de sitio, debido a que puede haber otras variables fisiográficas que también estén asociadas a las clases de sitio que no han sido medidas. Resultados antagónicos se encontraron en estudios similares realizados en la provincia del Chaco en *Prosopis alba*, donde variables fisiográficas como el drenaje y relieve tuvieron mayor impacto en la Hd, estableciendo una relación negativa entre la Hd y suelos con drenaje imperfecto y relieve subnormal (Kees et al., 2017).

4.2.4 Propiedades Físicas y Químicas

Entre las propiedades físicas evaluadas, el análisis de correspondencias múltiple para la textura y humedad actual (FIGURA 17) reporta un porcentaje de inercia del 38,3% que se considera bajo para este tipo de análisis, lo que podría indicar que estas variables al igual que las fisiográficas presentan una débil asociación con las clases de calidad de sitio. Sin embargo, se percibe una tendencia que la clase I se relacione a suelos con un contenido de humedad actual medio, diferenciándose de la clase III, que crece en sitios con un perfil de húmedo a mojado que se incrementa con la profundidad del perfil y se asocia a la presencia de salinidad. Esta situación se analizará con mayor detalle en el estudio de las propiedades químicas.

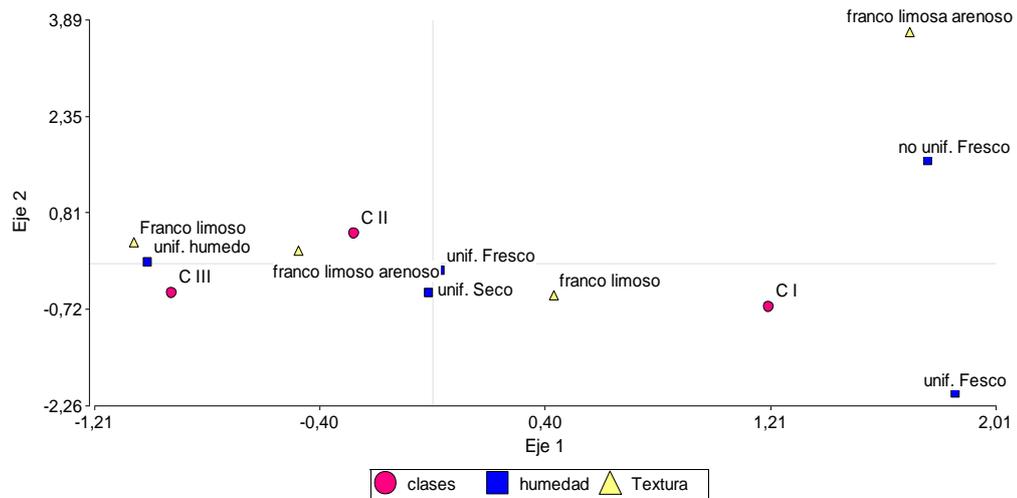


FIGURA 17: Gráfico biplot de Correspondencias Múltiples y la asociación de variables edáficas físicas (textura franco limoso arenoso y franco limoso; Humedad uniformemente húmedo, uniformemente seco, uniformemente fresco y no uniformemente fresco) con las clases de calidad de sitio (C I: Clase I, C II: Clase II y C III: Clase III).

No hay una clara asociación de la textura con las mejores condiciones para la calidad de estación (FIGURA 17), resultados contrarios se obtuvieron para plantaciones de *Prosopis alba* en el Chaco, donde la Hd se correlacionó positivamente a la presencia de suelos con textura superficial liviana (Kees et al., 2017). El resto de las variables físicas evaluadas fueron la porosidad y densidad aparente. El análisis de componentes principales registra una correlación positiva de las mejores calidades de sitio con la porosidad total (PT) en los horizontes y una correlación negativa con la DA. El CP1 explica un 63,6% de la variabilidad de las clases asociando una mejor calidad de sitio con mayor PT y menor DA (FIGURA 18).

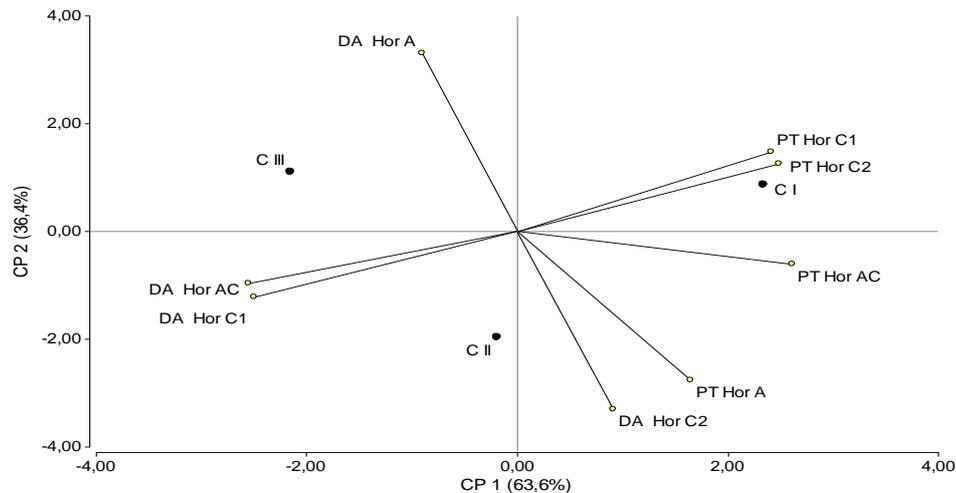


FIGURA 18: Biplot de un Análisis de Componentes Principales para las variables físicas, porosidad total (PT) y densidad aparente (DA) en diferentes horizontes del perfil, en relación a las clases de calidad de sitio

Para confirmar los datos anteriores, se comprueba que la densidad aparente y porosidad total presentan diferencias altamente significativas de la clase I con respecto a II y III (valor de F 9,3 y 7,8 $p < 0,0001$ respectivamente), sin embargo las clases III y II son iguales entre sí, dado que su valor $p = 0,1194$ indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas por ser mayor al nivel de significación utilizado ($\alpha = 0,05$). Estudios similares en *Pinus sylvestris* en la Península ibérica determinaron que la variable porosidad con valores promedios de 49%, era el parámetro del medio físico del suelo de mayor relevancia y poder explicativo en el Índice de Sitio de la especie (Mellado, 2012). La porosidad total es una variable de importancia entre las propiedades físicas y registra un rango de 44 a 51% con los mayores valores para la clase I. Sin embargo desde un enfoque edáfico se concluye que la diferencia en porosidad entre clases no representa un valor de relevancia.

Para resumir, en los sitios con mejor crecimiento, aparece un perfil uniformemente fresco y no encharcado, una mayor permeabilidad y buen drenaje (FIGURA 19). En concordancia con Schlatter y Gerding (1995), quienes expresan que el régimen de humedad del perfil se verá beneficiado con texturas francas con mayor porcentaje de limo que de arena y un mayor porcentaje en la porosidad; a su vez el drenaje interno y la permeabilidad juegan un papel importante en el abastecimiento de agua en el perfil, situación que se correlaciona positivamente con una mayor productividad forestal.

Senilliani, M.G., La calidad de sitio como condicionante del crecimiento y la calidad de frutos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

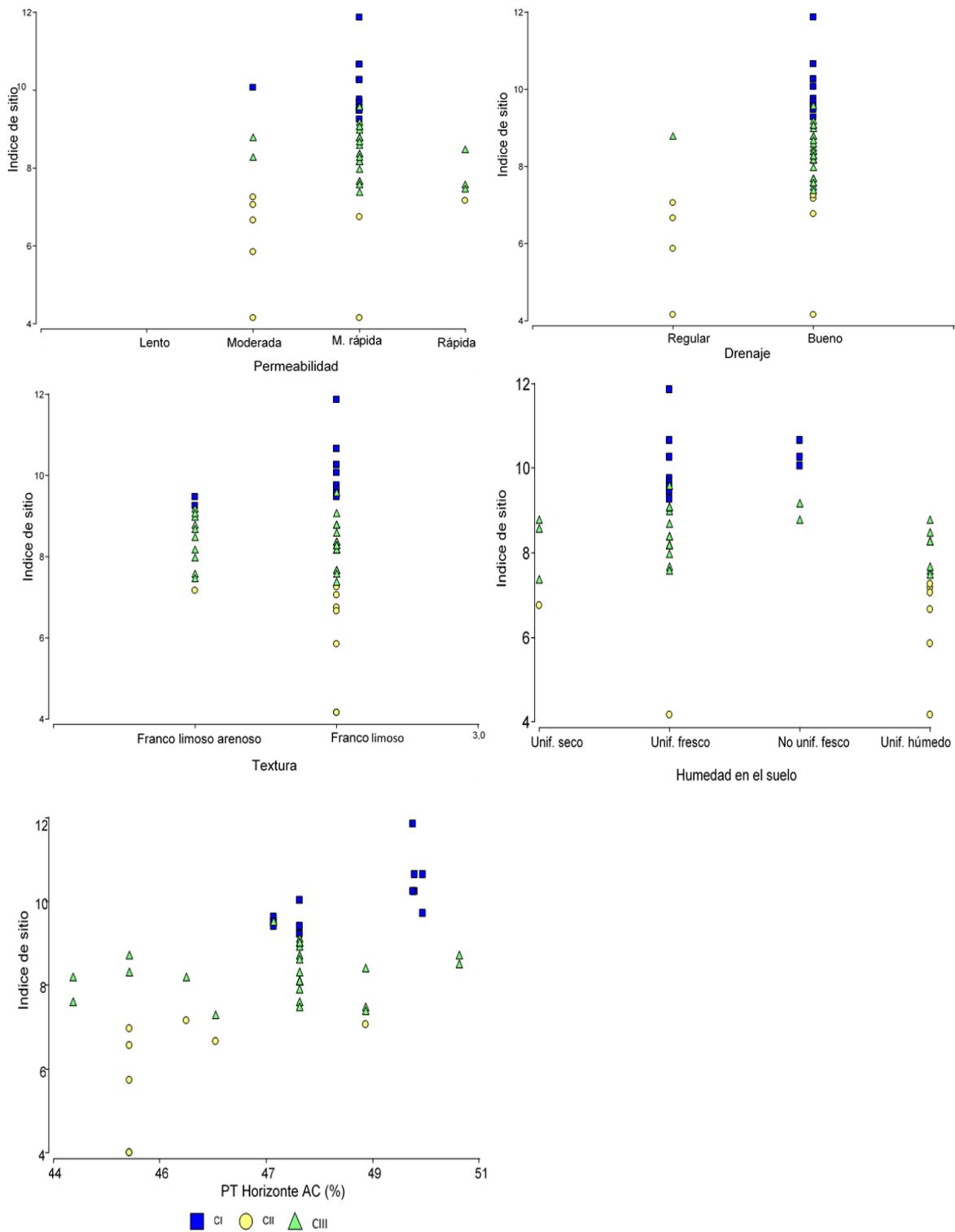


FIGURA 19: Relación del Índice de sitio con la permeabilidad (arriba izquierda), el drenaje (arriba derecha), la humedad del perfil del suelo (centro derecha), la textura (centro izquierda), porosidad total (abajo izquierda) en los suelos de los rodales.

El comportamiento de las propiedades químicas en relación a la calidad de sitio es variable (FIGURA 20). La conductividad eléctrica (CE) registra curvas bien diferenciadas para cada una de las clases pero los valores dentro de la clase son homogéneos en profundidad. El pH se incrementa moderadamente en profundidad pero no muestra diferencias entre clases. Sin embargo la concentración de los cationes solubles se diferencian entre clase, principalmente el sodio, que registra para las clase I y II concentraciones bajas en superficie y más altas en los horizontes profundos, al contrario de la clase III que registra altas concentraciones en superficie.

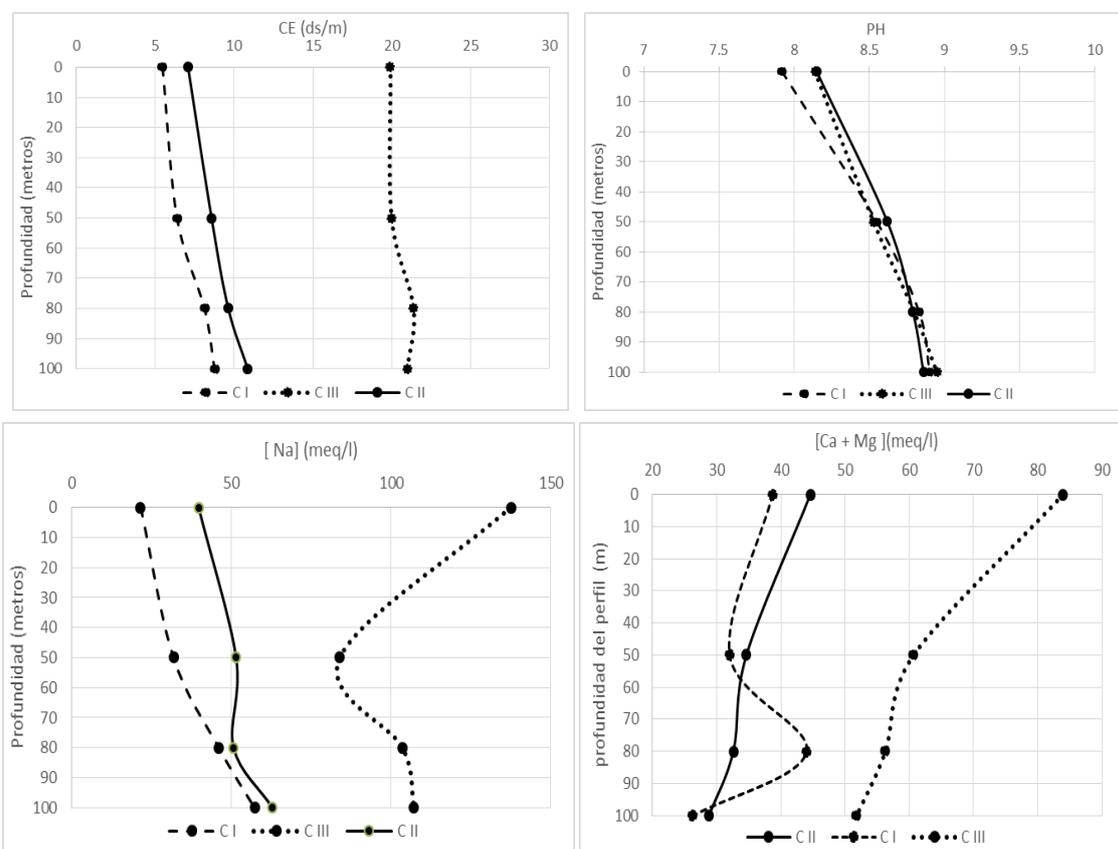


FIGURA 20: Variación de las propiedades químicas CE, pH, [Ca+Mg] y [Na], en la profundidad del perfil y para cada clase de sitio (C I, C II y C III).

El comportamiento de los cationes solubles en el perfil de la clase I y II podría indicar que existe cierta movilidad del Na desde la superficie hacia los horizontes más profundos como resultado del aporte esporádico de agua de riego que se han registrado en las plantaciones. Sin embargo la clase III aun habiendo tenido aportes de agua, no presenta mejores condiciones manteniendo mayor concentración de sodio en superficie, atribuible a

sitios o áreas que ante la influencia de la geomorfología de los suelos constituyen áreas deprimidas del paisaje salinizadas.

El resultado del ACP donde se asocian las propiedades químicas con las clases de sitio explica el 88% de la variabilidad en el componente 1. La conductividad eléctrica (CE), relación de adsorción de sodio (RAS) y cationes solubles (Ca, Mg y Na) posee los mayores valores en los coeficientes y se asocian a los sitios más vulnerables (Clase III). En el componente 2 se selecciona el pH en horizonte C1 (FIGURA 21).

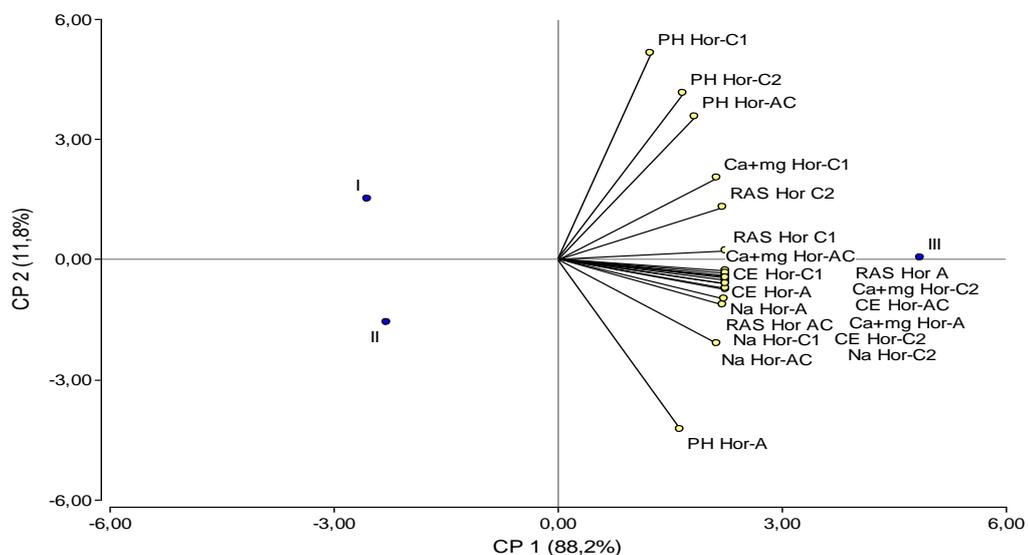


FIGURA 21: Biplot de un Análisis de Componentes Principales para las variables químicas, pH, Cationes solubles (Ca +Mg, Na), Conductividad eléctrica (CE) y RAS en diferentes horizontes del perfil, en relación a las clases de calidad de sitio (I, II y III).

Las propiedades químicas a diferencia de las físicas y fisiográficas, son determinantes, presentando diferencias altamente significativas entre clases y en cada uno de los contrastes entre clases (Clase I vs Clase II, valor $p=0,0004$, Clase I vs Clase III, valor $p<0,0001$ y Clase II vs Clase III, valor $p=0,0024$). Estos resultados son antagónicos a los obtenidos en plantaciones de *Prosopis alba* en la provincia del Chaco, donde los factores fisiográficos y variables como la textura tuvieron un impacto positivo en la calidad de sitio, a diferencia del pH y la CE, que fueron desestimados por no tener capacidad explicativa sobre la calidad del sitio (Kees et al., 2017).

Se observa que la presencia de carbonatos es bastante uniforme en la mayoría de los casos registrándose una leve tendencia a disminuir el IS en la calidad I a mayor porcentaje

de carbonatos, no así en las demás clases donde en general no pareciera representar una limitante importante para el crecimiento (FIGURA 22). El pH registra un rango de 7 a 9, donde los rodales tienen IS desde bajos a altos, sin embargo por encima de pH 9 asociado este parámetro a altas CE reduce el crecimiento de la masa. El pH y la presencia de carbonatos guarda cierta relación, pues forman un importante sistema buffer, manteniendo el pH en un rango de levemente ácido a levemente alcalino (Lorenz, 2005), sin embargo la correlación entre ambas variables fue baja en este estudio (Tabla 11). La CE presenta un umbral aproximado de 10 dsm^{-1} donde se registran IS de 8 y 10, por encima de este valor de CE disminuye el crecimiento de la masa. La concentración de cationes solubles también varía en relación al IS, los rodales de mejor crecimiento (clase I) se presentan en un margen acotado de concentraciones bajas de sodio, llegando a un valor crítico de aproximadamente 35 meq/l . Las clases II a III tienen un margen más amplio de tolerancia a la presencia de sodio en solución llegando a valores de 300 meq/l en algunos casos. El RAS no supera el valor de 15 para la clase I sin embargo las demás clases crecen hasta valores de 30. Ante la geomorfología de los suelos de la región es notable la relevancia que tienen las variables químicas del suelo en contraposición a otros sitios de estudio, como la provincia del Chaco donde el 58% de la variabilidad en Hd en plantaciones de *Prosopis alba* se relaciona a variables fisiográficas (relieve, drenaje) y edáficas (textura) (Kees et al., 2017). En otra especie, como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Patagonia Argentina, se reporta que más del 67% de la variación del Índice de Sitio fue explicada principalmente por variables fisiográficas y edáficas del suelo entre ellas el contenido de materia orgánica, profundidad del horizonte A, exposición, altitud, profundidad total del suelo y textura (Davel y Ortega, 2003).

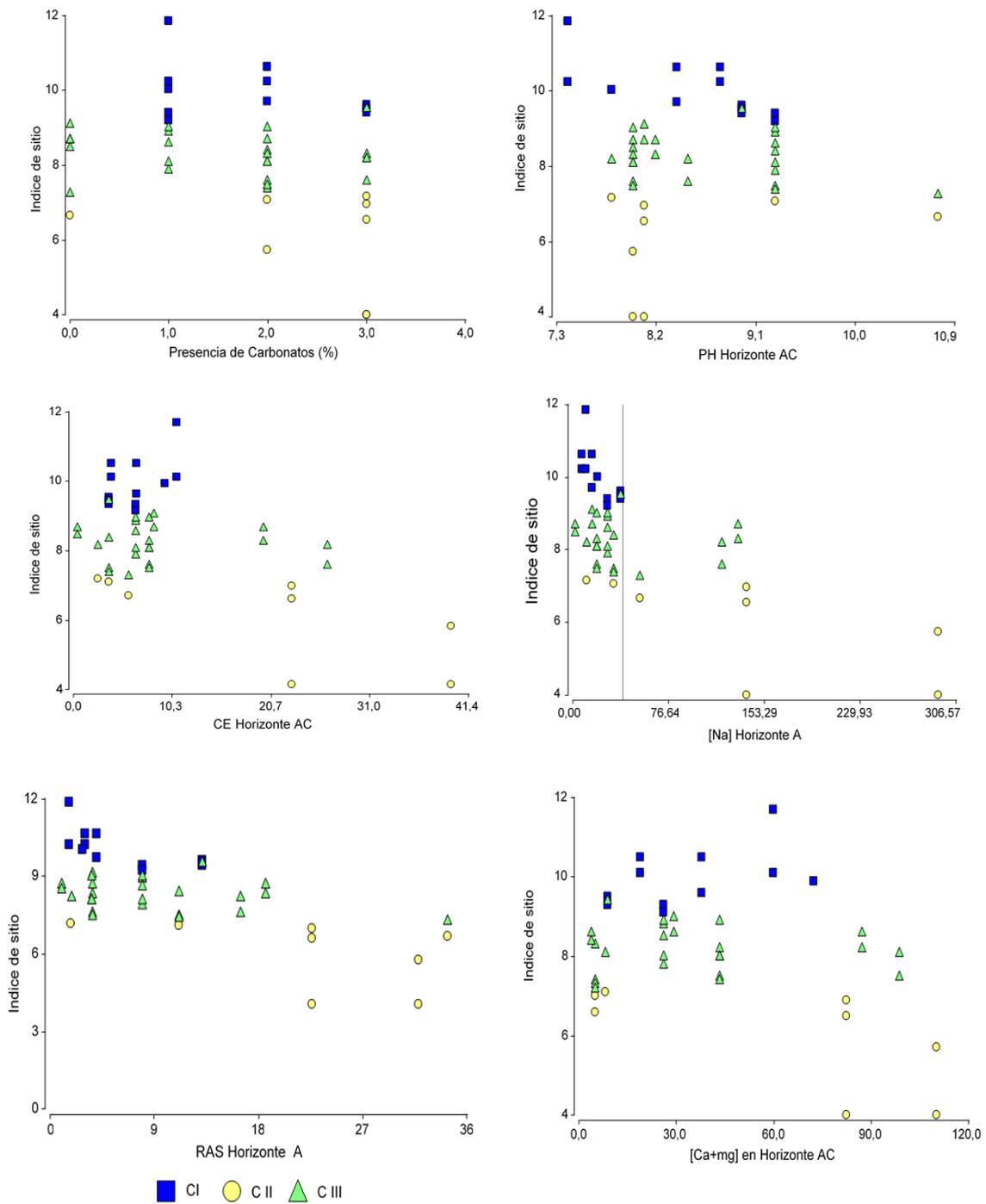


FIGURA 22: Relación del Índice de Sitio con el contenido de carbonatos en el perfil, pH, CE, cationes solubles y RAS en suelos de los rodales.

Las variables evaluadas hasta el momento y que han tenido mayor impacto en el crecimiento de algarrobo, podrían presentar correlaciones entre sí (Tabla 11).

TABLA 11. Matriz de correlación de Pearson con 11 variables seleccionadas: CE en horizonte A, porosidad total en horizonte AC, pH en horizonte C1, textura (Text), concentración de Na, Ca y Mg, RAS en horizonte A, permeabilidad (Pe), drenaje (D), relieve (Rel) y carbonatos (Carb).

| | CE Hor-A | PT Hor AC | pH Hor- C1 | Text | Na Hor-A | RAS Hor A | Ca+mg Hor-A | Pe | D | Rel | Carb |
|----------------|-------------|-----------------|------------------|-------|-------------|--------------|----------------|-------|-------|------|------|
| CE Hor-A | 1,00 | | | | | | | | | | |
| PTHor AC | -0,67 | 1,00 | | | | | | | | | |
| pH Hor-C1 | -0,27 | 0,19 | 1,00 | | | | | | | | |
| Text | 0,26 | -0,24 | - | 1,00 | | | | | | | |
| | | | 0,57 | | | | | | | | |
| Na Hor-A | 0,97 | -0,73 | - | 0,24 | 1,00 | | | | | | |
| | | | 0,14 | | | | | | | | |
| RAS Hor A | 0,65 | -0,68 | 0,33 | 0,16 | 0,78 | 1,00 | | | | | |
| Ca+Mg Hor-A | 0,87 | -0,63 | - | 0,40 | 0,76 | 0,33 | 1,00 | | | | |
| | | | 0,53 | | | | | | | | |
| P | -0,39 | 0,53 | 0,52 | -0,50 | -0,36 | -0,18 | -0,52 | 1,00 | | | |
| D | -0,58 | 0,52 | 0,22 | -0,23 | -0,62 | -0,50 | -0,44 | 0,63 | 1,00 | | |
| Rel | 0,15 | -0,12 | - | -0,20 | 0,08 | -0,29 | 0,26 | -0,05 | -0,11 | 1,00 | |
| | | | 0,39 | | | | | | | | |
| Carb | 0,37 | -0,5 | - | 0,41 | 0,41 | 0,20 | 0,4 | -0,21 | -0,28 | 0,25 | 1,00 |
| | | | 0,38 | | | | | | | | |

Valores en negrita corresponden a correlaciones estadísticamente significativas (valor $p < 0,0001$)

Se observa una alta correlación entre la CE y la concentración de Na y de los cationes Ca+Mg en horizonte A. A su vez el Na se correlaciona al RAS y a la concentración de Ca+Mg, efecto predecible debido a la relación existente entre estos parámetros en términos de salinidad. La porosidad total también muestra una correlación negativa con respecto a la concentración de sodio en el suelo. Las correlaciones encontradas serán de utilidad al momento de definir las variables más explicativas del crecimiento en altura en los modelos de predicción (Tabla 11).

4.2.5 Relación crecimiento-suelo

La capacidad productiva de la especie está influenciada por el sitio de crecimiento, así lo expresa la Hd. El DAP es aproximadamente igual en las clases I y II, pero presentan menores valores en la clase III.

De las propiedades edáficas evaluadas, el pH, % de Carbonatos y DA registran menores variaciones a través de las clases de sitio, que la CE, RAS, Na, Ca+ Mg y PT (Tabla 12).

TABLA 12: Valores promedios y desviación estándar (DE) para variables dasométricas, propiedades químicas y físicas del suelo por clase de calidad de sitio en rodales con edades de 15 a 16 años.

| | Clase de calidad de sitio | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|------|----------|------|-----------|------|
| | Clase I | | Clase II | | Clase III | |
| | promedio | DE | promedio | DE | promedio | DE |
| Variables dasométricas | | | | | | |
| Hd (m) | 9,35 | 0,07 | 8,05 | 0,78 | 6,85 | 0,35 |
| DAP (cm) | 19,8 | 0,49 | 20,2 | 19,6 | 17,8 | 9,1 |
| Variables químicas | | | | | | |
| Carbonatos (%) | 1,8 | 0,8 | 1,6 | 1,0 | 2,3 | 1,0 |
| pH Hor-AC | 8,5 | 0,6 | 8,6 | 0,7 | 8,5 | 1,0 |
| CE Hor-AC (dSm ⁻¹) | 6,3 | 2,7 | 8,5 | 7,0 | 19,9 | 14,9 |
| Ca+Mg Hor-AC (meq/l) | 32,0 | 21,9 | 34,6 | 29,8 | 60,7 | 46,6 |
| Na Hor-AC (meq/l) | 31,8 | 3,6 | 51,4 | 55,4 | 83,8 | 69,9 |
| RAS Hor AC (meq/l) | 9,7 | 4,0 | 13,0 | 10,0 | 19 | 13,1 |
| Variables físicas | | | | | | |
| DA Hor AC (g/cm ³) | 1,2 | 0,1 | 1,3 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| PT Hor AC (%) | 48,9 | 1,2 | 47,6 | 1,7 | 45,8 | 1,4 |

De acuerdo con los resultados presentados, en relación al impacto de factores fisiográficos y propiedades físicas-químicas del suelo en el crecimiento, se puede inferir que el crecimiento está condicionado negativamente por la CE y demás parámetros característicos de las condiciones de salinidad en los suelos.

Según Salazar Zarsoza (2018), el fuerte efecto de la fertilidad y las propiedades químicas del suelo en la disponibilidad de nutrientes en la planta, reporta resultados que indican, por ejemplo, que la concentración de fósforo en el suelo es un nutriente limitante

para algarrobo en los bosques secos afectando la disponibilidad para la planta. La concentración de P en los suelos podría llegar a ser una limitante en los bosques debido a que la disponibilidad de este nutriente es óptima en rangos de pH de 5 a 6 (Salazar Zarsoza, 2018), que no es el caso de las áreas estudiadas, donde se registran rodales de baja a alta productividad aun cuando todos los sitios están en un rango de pH de 7 a 9. Se podría decir que quizás la limitante en P no sea determinante en el comportamiento de los rodales de *Prosopis alba*. Sin embargo, la influencia de alta CE en los suelos muestra un impacto mayor. Según Rhoades y Chanduvi, (1999) este parámetro se correlaciona directamente con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), capacidad de retención de agua y porosidad, influyendo en la fertilidad. En coincidencia con este aspecto, se observa que los perfiles más salinos poseen problemas de drenaje por lo que se muestran mojados en profundidad.

Otro de los aspectos a considerar en suelos salinos, es la fijación de nitrógeno a través del proceso de simbiosis, característico en leguminosas. Se ha documentado en diversos estudios que este proceso se ve notablemente reducido en algunas especies agrícolas (Geetanjali, 2008) como también en especies forestales. Meloni (2004) evaluó su influencia en plántulas de *Prosopis alba*. En este caso la salinidad afecta el proceso de infección de la micorriza por la inhibición del crecimiento radicular, por decrecimiento en el número de nódulos y la cantidad de nitrógeno fijado por unidad de peso de nódulos (Geetanjali, 2008). El rendimiento decrece por carencia de una simbiosis satisfactoria (Hafeez et al., 1988); siendo quizás una medida acertada el uso de microorganismos que actúen tanto en condiciones salinas como no salinas. Se reportan asociaciones exitosas con la micorriza *Glomus intraradices* que mejoran el balance hídrico y la fotosíntesis de *P. alba* y *P. hassleri* en condiciones de salinidad (Scambato et al., 2013).

4.2.6 Umbral salino

El crecimiento de las plantaciones se ve influenciado principalmente por la salinidad de los suelos de la región, con valores umbrales para cada clase de sitio (Tabla 13), en referencia a las variables CE, Na en superficie, pH y RAS. La calidad de sitio I se corresponde con plantaciones en un rango de $11,2 \geq Hd \geq 9,2$ que crecen en suelos con pH (8) básicos a ligeramente alcalinos, baja CE (6,3 ds/m) y reducida concentración de sodio en horizontes superficiales (21 meq/l).

TABLA 13: Valores umbrales por clase de calidad de sitio para las variables edáficas químicas, concentración de sodio (Na^+) en horizonte A (meq/l), conductividad eléctrica (CE) del Horizonte AC (dSm^{-1}), pH y RAS en rodales de 15 a 16 años.

| Clases de calidad de sitio | Na^+ | CE | pH | RAS |
|----------------------------|---------------|------|-----|-----|
| I | 21,5 | 6,3 | 8,5 | 9,7 |
| II | 39,6 | 8,5 | 8,6 | 13 |
| III | 137,4 | 19,9 | 8,5 | 19 |

Las áreas de menor potencial en el crecimiento (clase III) se caracterizan por la presencia de suelos clasificados como salino-sódico (Arcos et al., 2013) ($\text{CE} > 4 \text{ dS.m}^{-1}$; $\text{RAS} > 12$; $\text{pH} \leq 8,5$). El pH es típico de un suelo con “salitre blanco”, con valores levemente superiores a 8.

Las plantaciones registradas en clase I y II, responden a perfiles salinos pero con niveles menores de CE y Na^+ a iguales valores de pH que la clase III. Esto concuerda con lo expresado por Toll Vera et al. (2016) quienes reportan buen crecimiento en plantaciones de *Prosopis alba* en la fase de establecimiento tanto en suelos agrícolas como en suelos salinos pero sin presencia de napa freática salina. Se reportaron porcentajes menores a 50% de sobrevivencia al tercer año de implantación en suelos salino-sódicos con saturación del perfil por aporte de la napa freática y condiciones de hipoxia (déficit de oxígeno) en la zona radical.

Según Boscá (2007), citado en Sánchez et al. (2016), la situación en el área de riego del río Dulce muestra un proceso de afectación por salinización en los campos regados por elevación del plano freático y por la misma razón en los no regados por exfiltración debido al ascenso capilar. Según Prieto et al. (2007) se registra principalmente acumulación de sales en áreas no regadas, no cultivadas o que se abandonan, mientras que la salinidad del perfil se mantiene baja en las tierras o parcelas que se riegan. Esta aseveración permite pensar que la notable diferencia de crecimiento observada en los bordes de las plantaciones en estudio en algunos lotes podría estar influenciada por aportes esporádicos de riego desde lotes agrícolas vecinos, generando el lavado de sales en el perfil, aumentando el área explorable por las raíces y mejorando de esta manera la respuesta del rodal. Factores como el exceso de riego y en algunos casos la escasa infiltración y drenaje de los suelos, son la causa principal de la salinización (Prieto, 2014).

La tolerancia de la especie al stress salino, común en las zonas áridas a semiáridas, fue verificado por Meloni et al. (2004) en plantas de vivero de *Prosopis alba* que toleran altos grados de salinidad (hasta 300mmol.L⁻¹ de NaCl) en el sistema radicular, viéndose afectado su crecimiento ante concentraciones cercanas a 600mmol.L⁻¹ de NaCl. Se ha estudiado ampliamente el efecto de la salinidad en plántulas de esta especie, no así el comportamiento de plantaciones adultas sometidas a este stress.

Este estudio coincide en la importancia e impacto que poseen las condiciones del sitio en el crecimiento de los árboles, con estudios en *Eucalyptus sp.*, *Pinus pinaster* y *Tectona grandis* (Delgado Caballero et al., 2009; Afif Khouri et al., 2012; Ypushima-Pinedo et al., 2014). Se verifica que las propiedades químicas evaluadas en los suelos con plantaciones de *Prosopis alba* presentan notables diferencias entre las clases de calidad, demostrando que son un factor de importancia e impacto en la productividad de la especie.

4.2.7 Modelos de predicción del Índice de Sitio

Los factores del sitio, principalmente las propiedades químicas relacionadas al tenor salino en suelos, influyen negativamente en el comportamiento y productividad de la especie. Para evaluar en qué medida estos factores comprometen el crecimiento se han ajustado modelos que describen esa relación.

Modelo 1

En función de los resultados del análisis de componentes principales, se determinaron las variables de mayor correlación con el crecimiento por calidad de sitio, con las cuales se realizó una regresión múltiple.

Se relacionó la variable IS con las variables dasométricas y edáficas, buscando un modelo de predicción del índice de sitio. Se ajustó la variable IS en función de las regresoras Hd, edad y cationes solubles de Na en horizonte A. En este modelo la variable concentración de Na hizo un aporte significativo en la capacidad explicativa de la variable respuesta. El coeficiente de determinación indicó que aproximadamente el 94 % de la variabilidad en el comportamiento del IS resulta explicado por las variables predictoras.

Se registraron valores altamente significativos ($p < 0,0001$) para todas las variables introducidas en el modelo a excepción de la variable concentración de Na en horizonte A cuyo aporte es menor. Sin embargo, la incorporación de esta variable tiene un mayor impacto en la explicación de la variable respuesta (Tabla 14).

TABLA 14: Los coeficientes de regresión y estadísticos

| Coeficiente | Estimador | E.E. | T | p-valor | Cp Mallows | VIF |
|-------------------|---------------------|----------------------|--------|---------|------------|------|
| constante | 4,5 | 0,45 | 9,96 | <0,0001 | | |
| Edad | -0,3 | 0,02 | -14,14 | <0,0001 | 201,8 | 1,5 |
| Hd | 1,04 | 0,06 | 16,6 | <0,0001 | 277,5 | 2,57 |
| Na en Horizonte A | -3×10^{-3} | $1,2 \times 10^{-3}$ | -2,3 | 0,0227 | 7,6 | 1,90 |

De acuerdo a los resultados del análisis se observa en las Figuras 23 a y b el cumplimiento de los supuestos de normalidad.

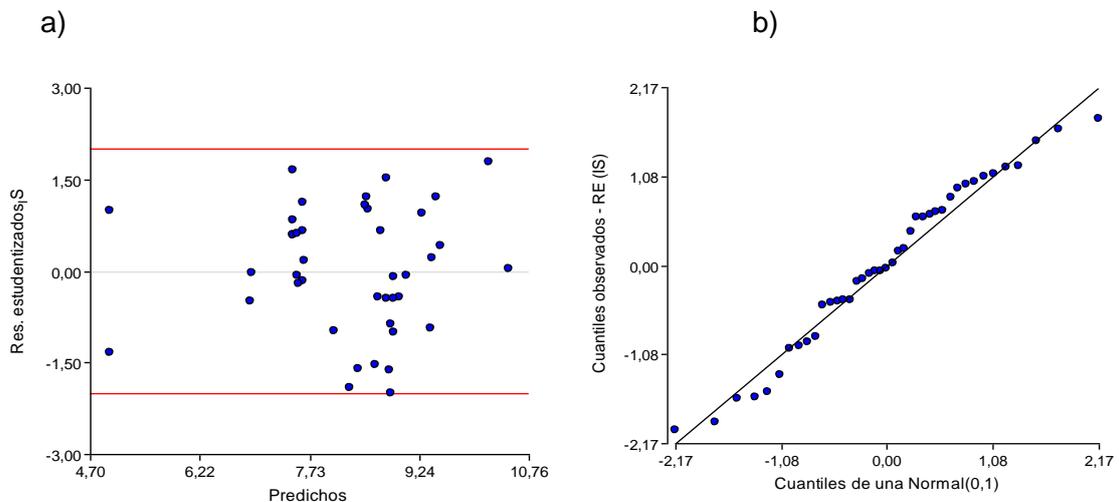


FIGURA 23 a y b: variabilidad de los residuos vs predichos y grafico Q-Qplot que determina la normalidad de las observaciones en el modelo 1.

En cuanto a la homogeneidad de varianzas se podría decir que no existe un patrón determinado que indique presencia de heterocedasticidad. Los residuos parciales de las figuras 24 a, b y c muestran una relación lineal de las variables incluidas en la regresión con respecto al IS.

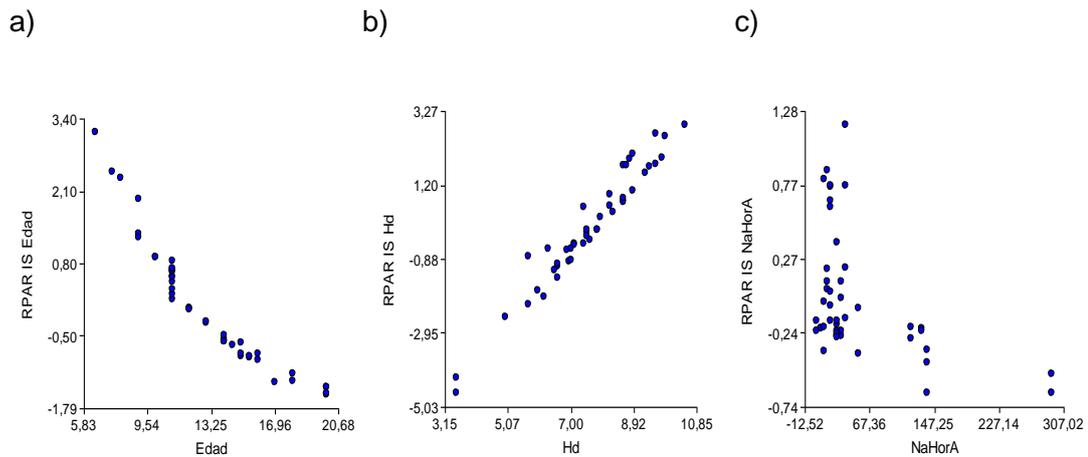


FIGURA 24 a, b y c: Residuos parciales para cada una de las variables regresoras en relación al IS.

El modelo de predicción resultante es aplicable en aquellas áreas donde las masas forestales están presentes y donde se pretende estimar la calidad de sitio mediante la variable de crecimiento (Hd) adicionando un factor ambiental (Na) que mejore la precisión en la estimación. El modelo que se genera a partir de la regresión es:

$$IS = 4,5 + 1,04Hd - 0,003[Na] - 0,3Edad [4]$$

Modelo 2

Para el ajuste del modelo 2 se relacionó la variable IS solo con variables edáficas, con el objetivo de lograr un modelo de predicción del Índice de Sitio para situaciones donde no existen plantaciones de la especie en el lugar y se pudiera predecir el rendimiento.

La selección de las variables a introducir en el ajuste responde a aquellas que han tenido más impacto en el crecimiento. Se realizó la transformación de la variable “Concentración de sodio en Horizonte A” en Potencia (POT_Na Hor-A) para una mayor eficiencia del ajuste y se seleccionó como segunda variable la conductividad eléctrica del horizonte AC.

El coeficiente de determinación indicó que el 42 % de la variabilidad del IS resulta explicada por la variabilidad de los parámetros edáficos, aunque el grado de precisión en el ajuste no es alto, valores aproximados ($r^2= 46$) obtuvo Montero Mata (1999) en estudios

semejantes, para *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica, igualmente Mollinedo et al. (2005) obtuvo valores de $r^2= 46$ para *Tectona grandis* en Panamá.

Se verifica el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (FIGURA 25 a y b). Se registraron valores significativos de los estadísticos (EE, T y p valor) para las variables introducidas en el modelo de regresión múltiple y de las interacciones entre las mismas (Tabla 15).

TABLA 15: Los coeficientes de regresión y estadísticos

| Coeficiente | Estimador | E.E. | T | p-valor |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|-------|---------|
| constante | 8,81 | 0,21 | 41,47 | 0,0001 |
| POT_Na Hor-A | $-1,9 \times 10^{-4}$ | $6,8 \times 10^{-5}$ | -2,7 | 0,008 |
| CE Hor-AC * POT_Na Hor-A | $3,6 \times 10^{-6}$ | $1,8 \times 10^{-6}$ | 2,05 | 0,04 |

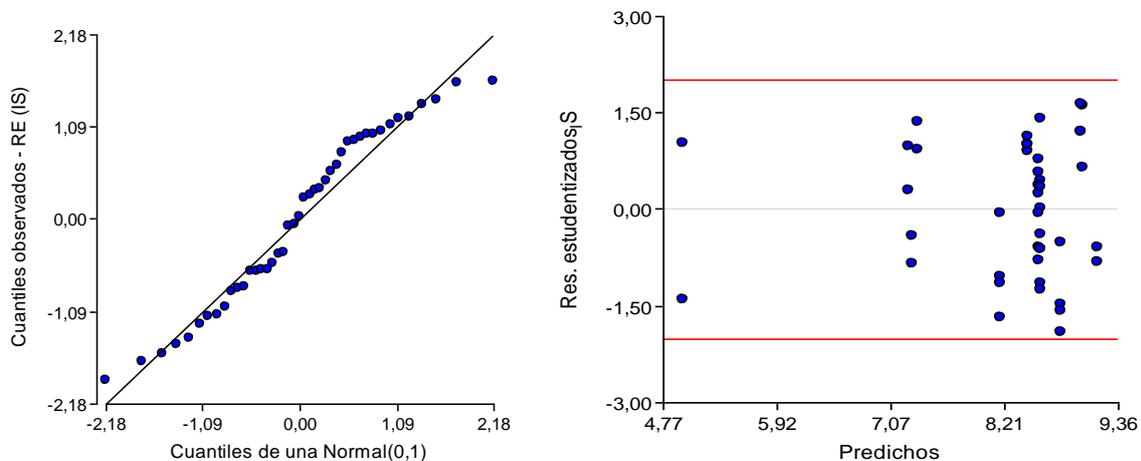


FIGURA 25 a y b: Variabilidad de los residuos vs predichos y grafico Q-Qplot que determina la normalidad de las observaciones del modelo 2.

El modelo de predicción que se genera es el siguiente:

$$IS = 8,81 - 1,9 \times 10^{-4} POT_Na.HorA + 3,6 \times 10^{-6} POT_Na.HorA * CEHorAC [5]$$

Validación de los modelos

Los parámetros para evaluar la precisión indican errores aceptables para los modelos establecidos (Tabla 16). En el modelo 1 se observa un error de 0,22 y CV de 5,5%. Para el modelo 2 que considera solo variables edáficas entre las variables predictoras, se puede decir que el error es mayor, 1,38 con un coeficiente de variación de 14%. Valores aproximados se reportaron en estudios similares en especies del trópico como *Tectona grandis*, en modelos que predicen el valor del Índice de Sitio en relación a variables edáficas con una diferencia del 13% (Mollinedo et al., 2005) o un error estándar de ± 3 a 4 metros en estudios con la misma especie donde se estudio el Índice de Sitio en relación a variables climáticas (Montero Mata, 1999).

TABLA 16: Parámetros que miden la precisión y la variabilidad de la estimación del modelo, el error cuadrático medio de predicción (ECMP) y el coeficiente de variación (CV)

| | Modelo 1 | Modelo 2 |
|--------|----------|----------|
| ECMP | 0,22 | 1,38 |
| CV (%) | 5,5 | 14 |

4.2.8 Impacto del sitio en el crecimiento

Este estudio establece preliminarmente los rangos de algunos parámetros edáficos de mayor impacto en el crecimiento que pueden orientar en la selección de los sitios de plantación. Se visualiza la existencia de un umbral salino a partir del cual el crecimiento de la especie se ve comprometido desde el punto de vista productivo, no así desde el enfoque de la rehabilitación de áreas degradadas, donde la especie puede cumplir un rol importante.



Fotos 26: Rodal de *Prosopis alba* de crecimiento regular y calicata para la descripción del perfil en el área de crecimiento



Fotos 27: Rodal de *Prosopis alba* de regular crecimiento y calicata para la descripción del perfil en el área de crecimiento



Fotos 28: Rodal de *Prosopis alba* de en sitio de mala calidad con alto grado de salinidad y perfil edáfico en el area de crecimiento



Fotos 29: Rodal de *Prosopis alba* en sitio de buena calidad con bajo grado de salinidad y perfil edáfico en el área de crecimiento

4.3 Calidad de frutos en relación al sitio

4.3.1 Análisis proximal en vainas

En el análisis de las vainas de *P. alba* la variable humedad presenta mayor desviación estándar (4,43), que las demás variables, que presentan valores menores a dos (Tabla 17).

TABLA 17: Valores promedios (%), desviación estándar (D.E) y valores máximos y mínimos de cada parámetro del análisis químico de vainas en plantaciones del área de riego de la provincia.

| Variable | Media | D.E. | Mín | Máx |
|---------------|-------|------|-------|-------|
| Humedad | 14,92 | 4,43 | 8,72 | 23,93 |
| Cenizas | 3,45 | 0,68 | 2,10 | 4,82 |
| Lípidos | 1,72 | 0,38 | 1,03 | 2,61 |
| Proteínas | 6,91 | 1,70 | 4,21 | 10,37 |
| FDT | 23,12 | 1,68 | 20,05 | 25,45 |
| Carbohidratos | 64,80 | 1,46 | 62,12 | 66,44 |

Los valores de humedad y carbohidratos en vainas son significativamente mayores al reportado por Sciammaro (2015) quien obtuvo valores de humedad que no superan un 9% y azúcares en 41,4% para diferentes regiones de Santiago del Estero. En coincidencia con Sciammaro (2015), la variación en contenidos de carbohidratos puede deberse a variaciones climáticas entre los años de cosecha. El periodo de formación de las vainas es dependiente del clima, alta radiación solar y disponibilidad de humedad edáfica influyendo en una mayor o menor generación de compuestos fotoasimilados los que se translocarían a los frutos almacenándose en forma de sacarosa. Respecto de la variación en contenido de humedad probablemente no dependa de la composición de las muestras sino de diferencias en el tiempo de almacenamiento (Sciammaro, 2015).

Así mismo, el porcentaje de proteínas encontrado en este estudio es inferior al encontrado por el citado autor (9,2%) sin embargo los valores de ceniza y lípidos coinciden.

En coincidencia con Boeri et al. (2017), el contenido de cenizas totales cuantificadas en este trabajo ($3,45 \pm 0,68$ %) representa el doble de las cantidades establecidas para harinas convencionales como las de trigo integral, de maíz y de sorgo (1,7; 1,1 y 2,1 %, respectivamente) (Surco Almendras & Alvarado, 2010) de lo cual se infiere que el aporte de minerales de harinas de *Prosopis* es mayor a las convencionales. Existen estudios que

evalúan la calidad nutricional de vainas enteras, harinas y semillas de diversas especies de *Prosopis*, así Boeri et al. (2017) cita estudios sobre *Prosopis alpataco* en la Patagonia donde describe una composición centesimal similar a *P. alba*, a excepción de los contenidos superiores de proteínas y lípidos (10,2 y 3,2 g/100 g) en el primero. Sin embargo los valores reportados de proteína estarían muy próximos al valor umbral de 8% considerado adecuado para la dieta de bovinos y equinos (Meglioli, 2009). El contenido de lípidos representa valores aceptables para consumo humano, ya que un alto contenido de lípidos en las harinas pueden afectar la calidad y estabilidad de las mismas durante el almacenamiento y provocar la rancidez del producto (Carrillo Inungaray et al., 2013).

En cuanto a los contenidos de fibra (Tabla 17), el porcentaje obtenido fue del 23 % similar al encontrado por Boeri et al. (2017), quienes concluyeron que para el caso de la alimentación humana, son importantes para mejorar el tránsito gastrointestinal y la eliminación de toxinas y colesterol por adsorción de las mismas (Escudero Álvarez & González Sánchez, 2006). En contraposición a lo anterior, Freyre et al. (2003) reporta valores de 17,8% de fibra en frutos de *Prosopis ruscifolia* concluyendo que sería un contenido elevado para consumo humano y aconseja su uso como forraje.

Se analizaron los parámetros del análisis proximal a modo exploratorio mediante análisis de conglomerados en relación con las clases de sitio preestablecidas (FIGURA 26). El criterio utilizado para trazar la línea de referencia ha sido la distancia igual al 50% de la distancia máxima, fijando un criterio de corte en 2. La mayor correlación cofenética obtenida corresponde a este análisis con un valor de 0,998.

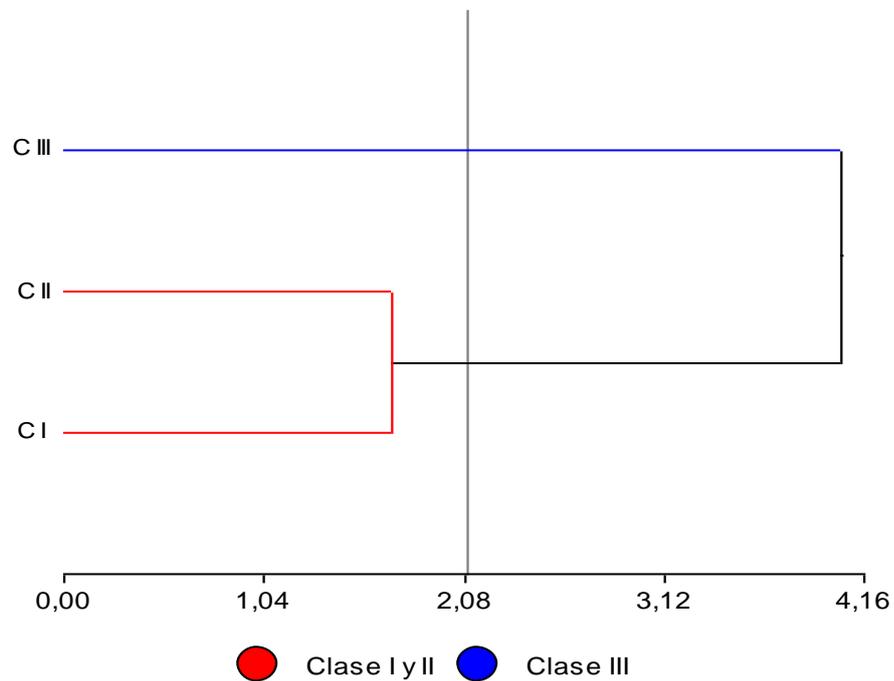


FIGURA 30: Dendrograma con la evaluación de calidad nutritiva de frutos a partir de los parámetros Humedad, Cenizas, Lípidos, Proteínas, FDT y Carbohidratos por clase de calidad de sitio.

Los resultados muestran que la clase III, de más baja calidad de sitio, presenta características diferentes al resto en lo que respecta a los parámetros citados, por lo cual se separa del resto (FIGURA. 30)

El análisis de la varianza multivariado sobre los parámetros citados, confirma que existe una diferencia significativa ($p < 0,0037$) entre las clases, detectando que solo la clase I se diferencia de la III en cuanto a la calidad de las vainas cosechadas. La clase II presenta similitudes con las otras clases (Tabla 18).

TABLA 18: Análisis de la varianza (Wilks) y prueba de Hotelling, muestran diferencias entre clases de calidad de sitio.

| Clase | Proteínas | FDT | Carbohidratos | Lípidos |
|-------|-----------|-------|---------------|----------|
| I | 7,01 | 22,98 | 65,31 | 1,56 A |
| II | 6,97 | 22,85 | 64,88 | 1,73 A B |
| III | 7,00 | 23,47 | 63,63 | 2,04 B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Las vainas cosechadas en los rodales de más baja calidad de sitio tienen menor contenido de azúcares que los demás y mayor porcentaje de lípidos y fibras. Los valores de proteínas no muestran diferencias por clase de sitio. Si bien el análisis muestra diferencias de la calidad de vainas en relación a la calidad de sitio, se ha considerado de importancia incorporar otras variables al estudio, que pudieran explicar mejor la variabilidad de los datos. Es el caso de la edad al momento de la cosecha y la densidad del rodal, variables que podrían influir en la respuesta junto al IS.

El análisis de la calidad de vainas con la edad registra diferencias altamente significativas entre edades ($p < 0,0001$), mostrando una tendencia a encontrar mayores concentraciones de carbohidratos, FDT y menor proteína en rodales de mayor edad (15 y 17 años) (Tabla 19).

TABLA 19: Medias ajustadas a través de un análisis de la varianza multivariado para comparar la edad de cosecha de los rodales con la calidad de vainas.

| Edades | Lípidos | Proteínas | FDT | Carbohidratos |
|--------|---------|-----------|-------|---------------|
| 8 | 1,58 | 8,29 | 21,77 | 64,83 ABC |
| 9 | 1,64 | 7,96 | 21,13 | 64,45 ABC |
| 10 | 2,03 | 8,00 | 23,00 | 63,17 B |
| 14 | 1,81 | 7,42 | 22,59 | 64,75 A |
| 15 | 1,40 | 5,06 | 24,17 | 65,85 C |
| 17 | 1,49 | 5,79 | 23,67 | 66,09 C |

Si bien el análisis muestra mayores valores para azúcares y FDT (de 1 a 3%), estos valores no representarían cantidades significativas a los fines de un uso potencial en la alimentación humana, en relación al rango de variación documentado de 35 a 67% en azúcares y 12 a 22% en FDT (Boeri et al, 2017). Sin embargo los valores reducidos en proteínas (2 a 3 % menos) para los rodales más adultos serían una limitante en el nivel proteico en el uso para forraje considerando el valor umbral de 8% que se reporta como adecuado para la dieta de bovinos y equinos (Meglioli, 2009).

Al relacionar la calidad de vainas con las densidades en los rodales, vemos que no existen diferencias significativas en la calidad de los frutos entre las densidades testeadas (Tabla 20), sin embargo es necesario resaltar que no se cuenta con observaciones en densidades extremas. Es posible además que la falta de diferencias en la calidad de los

frutos, principalmente carbohidratos, entre rodales sea una consecuencia de la falta de manejo oportuno de podas y raleos, considerando que en la mayoría de los casos los rodales han alcanzado la espesura completa. Estudios previos coinciden con este enfoque, demostrando que masas más abiertas ya sea por baja densidad o podas presentan mayores valores de carbohidratos (Corona-Castuera, 2000), permitiendo la entrada de mayor radiación solar al rodal, lo que favorecería a una mejor maduración de los frutos.

TABLA 20: Medias ajustadas a través de un análisis de la varianza multivariado para comparar las densidades de los rodales con la calidad de vainas.

| Densidades | Proteínas | FDT | Carbohidratos | Lípidos |
|------------|-----------|-------|---------------|---------|
| 416 | 6,5 | 22,78 | 65,20 | 1,40 AB |
| 500 | 5,94 | 25,00 | 64,33 | 1,03 AB |
| 555 | 7,52 | 22,49 | 65,43 | 1,88 A |
| 625 | 7,47 | 22,78 | 64,13 | 1,60 B |
| 666 | 5,35 | 23,93 | 65,76 | 1,84 AB |

En concordancia con la edad de cosecha, la densidad no muestra una influencia determinante en la calidad de las vainas.

Como se vio en capítulos anteriores, la calidad de sitio decrece principalmente ante concentraciones altas de cationes solubles principalmente de sodio, que a partir de un umbral dicha concentración genera stress salino y disminución del crecimiento. Con relación a la calidad de vainas tienden a presentar menor contenido de azúcares. Según Meloni et al. (2014), las sales presentes en la solución del suelo pueden inhibir el crecimiento vegetal mediante dos efectos: a) disminución del potencial hídrico del suelo, lo que dificulta la absorción de agua, y por ende la tasa de crecimiento (efecto osmótico), b) si un exceso de sales ingresa a la corriente transpiratoria, éstas pueden llegar a las hojas y producir alteraciones en el metabolismo (efecto de toxicidad) (Greenway y Munns, 1980). Según Meloni et al. (2014) las áreas de menor calidad de sitio, estarían bajo un efecto osmótico que altera el crecimiento. Si bien los procesos de conformación de las vainas son dependientes del clima y alta radiación solar, la limitante en la disponibilidad de humedad puede ser un factor de importancia que posibilite una menor generación de compuestos fotoasimilados los que se translocarían pobremente a los frutos almacenándose en forma de sacarosa (Sciammaro, 2015). Como resultado se tendrían áreas de baja calidad asociadas a bajo contenido de carbohidratos en vainas. Sin embargo, Kramer and Kozlowski, 1979; Oduol, 1986 llegan a resultados inversos en cuanto al contenidos de azúcares en vainas. En efecto,

en condiciones de menor humedad en el suelo la concentración de azúcares en frutos es mayor, atribuyéndose a una acumulación de carbohidratos en aquellas plantas con mayor grado de estrés hídrico. Estos resultados representan tendencias que pueden ser útiles para el manejo de rodales con fines de producción de frutos, reconociendo la importancia de profundizar su estudio hacia otros sitios y a una escala temporal.

4.4 Crecimiento y producción

En los apartados anteriores se ha evaluado el potencial de la especie considerando la altura dominante y su relación con el sitio. Se considera necesario en esta etapa describir la dinámica de crecimiento atendiendo el comportamiento de las demás variables dasométricas desde el enfoque del crecimiento en rodales y árbol individual.

4.4.1 Crecimiento de árbol individual

A partir del estudio epidométrico de 13 individuos dominantes que crecieron en diferentes calidades de sitio, se evaluó el crecimiento en cada caso. El incremento corriente anual promedio sin considerar las diferencias por sitio fue de 1,2 cm con desviación estándar de 0,3 cm y el coeficiente de variabilidad de 24,6%. El rango de edades para los árboles estudiados fue de 11 a 20 años (Tabla 21).

Estudios similares en especies nativas de la región chaqueña obtuvieron valores alejados a los encontrados en este estudio, como es el caso de la misma especie, *Prosopis alba*, en rodales nativos con una tasa de crecimiento radial promedio de 0,4 cm/año (Galíndez et al., 2008), *Prosopis kuntzei* con rangos en el incremento anual en diámetro de 0,4 a 0,7cm/año (Ríos et al., 2001), sin embargo *Geoffreea decorticans* presenta valores con mayor similitud, con un incremento radial promedio de 0,59 cm siendo una de las especies de mayor crecimiento medio en bosque nativo y de muy buenas perspectivas de aprovechamiento (Giménez et al., 2013). En concordancia con Rossi (2014), se puede decir que las diferencias en el crecimiento de *Prosopis* proveniente del bosque nativo y la plantación podrían atribuirse a los distintos ambientes generados durante el desarrollo de los individuos bajo un esquema de manejo silvicultural que resulta en un mayor crecimiento.

Tabla 21: Estadística descriptiva por árbol a partir de las series de incremento radial para el incremento anual en diámetro (ICA), DAP, volumen de fuste (VF), altura total (HT) y calidad de sitio.

| Calidad de sitio | Árbol | Edad (años) | ICA (cm/año) | | Volumen | |
|------------------|-------|-------------|----------------|----------|------------------------|--------|
| | | | promedio/árbol | DAP (cm) | (m ³) | HT (m) |
| I | 6 | 15 | 1,3 | 19,8 | 0,07 | 9,3 |
| I | 7 | 14 | 1,1 | 15,8 | 0,04 | 8,9 |
| II | 1 | 14 | 1,2 | 17,2 | 0,04 | 8,3 |
| II | 2 | 20 | 1,2 | 24,2 | 0,14 | 9,6 |
| II | 3 | 14 | 1,0 | 15,2 | 0,04 | 7,8 |
| II | 4 | 20 | 1,2 | 24,8 | 0,12 | 8,6 |
| II | 5 | 14 | 1,1 | 15,4 | 0,04 | 8,6 |
| II | 8 | 20 | 1,4 | 28,4 | 0,17 | 8,6 |
| II | 9 | 11 | 0,9 | 10,9 | 0,01 | 7,0 |
| II | 10 | 11 | 1,3 | 15,0 | 0,02 | 7,5 |
| II | 12 | 11 | 1,1 | 12,7 | 0,02 | 7,0 |
| III | 11 | 11 | 0,6 | 7,1 | 4,4 x 10 ⁻³ | 3,5 |
| III | 13 | 11 | 1,0 | 12,1 | 0,02 | 3,5 |

4.4.1.1 Diámetro

Se analizó el crecimiento en diámetro a partir del incremento acumulado en relación a la edad de los 13 individuos sin diferenciar por sitio. El análisis del ritmo de crecimiento presenta pendientes homogéneas a través del tiempo, alcanzando aproximadamente 25 a 28 cm de diámetro a la edad de 20 años (FIGURA 31).

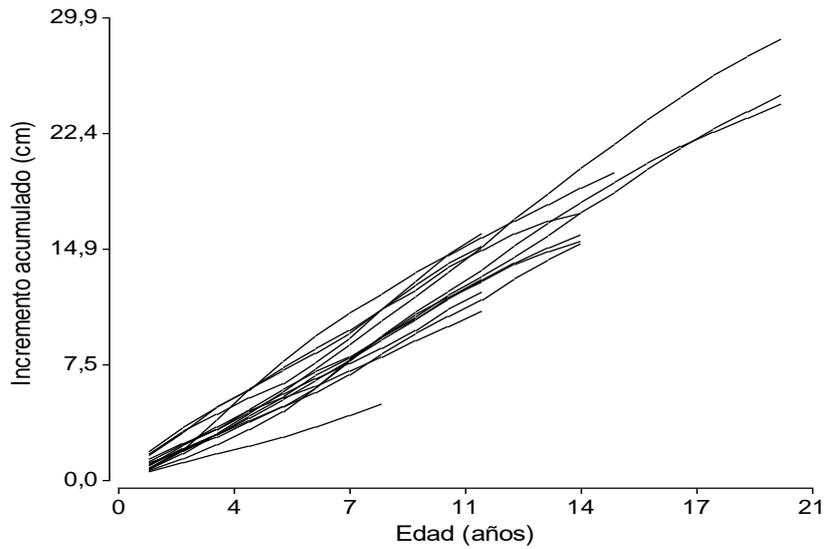


FIGURA 31: Incremento acumulado (cm) en relacion a la edad del arbol, obtenido a partir del analisis epidométrico de 13 árboles seleccionados en los sitios de estudio.

El proceso de crecimiento en diámetro en relación a la edad para cada clase de calidad de sitio, confirma lo anteriormente expresado (FIGURA 32).

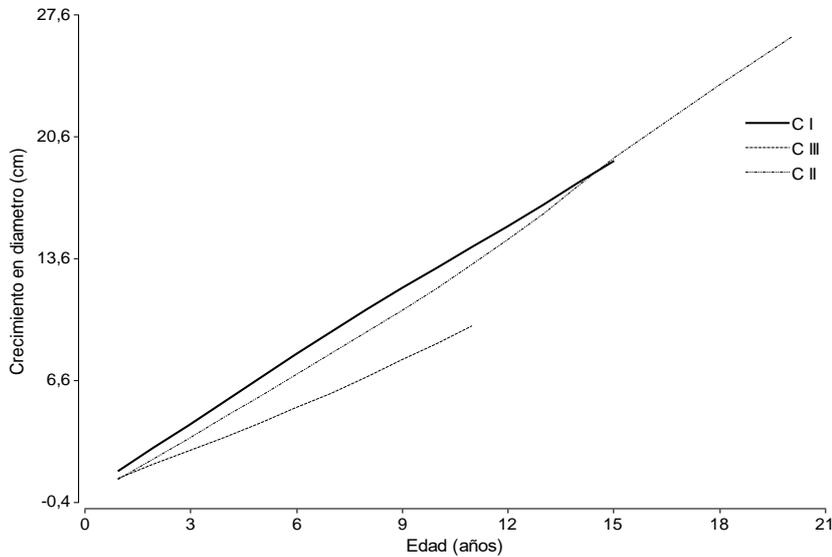


FIGURA 32: Crecimiento en diámetro en cada clase de calidad de sitio

Se registra un ritmo de crecimiento similar y curvas con pendiente parecidas entre las clases, sin embargo a medida que aumenta la edad se profundizan las diferencias de la clase I y II con respecto a la III que evoluciona con una pendiente menor. Que no se reporte una diferencia marcada en el incremento en diámetro de los rodales entre clases de calidad

podría sugerir que el comportamiento del DAP puede estar enmascarado ante la falta de manejo de estos rodales. Esta situación confirma que el DAP no es la variable más apropiada para describir las diferencias en la calidad de sitio, siendo la Hd a una edad particular el indicador más sensible de la calidad de sitio. (Daniel, 1982; Skovsgaard y Vanclay 2008).

Al analizar el ICA e IMA para la variable DAP por clase de calidad de sitio se fijó la edad de 11 años (tabla 22) como edad común para todos los individuos en estudio. En la clase II se analiza el crecimiento para dos densidades (625 y 250 pl/ha).

TABLA 22: Valores promedio para las variables DAP, ICA e IMA en diámetro por densidad de plantación y clase de sitio a los 11 años.

| Variable | | Calidad de sitio | | | |
|----------|--------------|------------------|----------|-----------|-----------|
| | | I | II | | III |
| | | ----- | ----- | | ----- |
| | | - | | | |
| | | 625pl/ha | 625pl/ha | 250 pl/ha | 625 pl/ha |
| Diámetro | DAP(cm) | 14,33a | 13,03a | 13,98a | 9,67b |
| | IMA(cm/año) | 1,3a | 1,18a | 1,27a | 0,88b |
| | ICA (cm/año) | 1,16 a | 1,05 a | 1,44 b | 0,85 a |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados del análisis de la varianza indican que el DAP e IMA no varían significativamente entre clases, a excepción de la clase III donde se obtuvieron valores menores en ambas variables. Sin embargo se registra una diferencia significativa (valor de F 6,67 $p < 0,01$) en la tasas de crecimiento anual (ICA) con el mayor valor para la clase II a menor densidad. Esta situación se puede deber a que el individuo mantiene una tasa alta de crecimiento en diámetro por la falta de competencia por el espacio, a diferencia de rodales con mayores densidades. Los valores de ICA obtenidos son semejantes a estudios realizados por Rossi, (2014), quien reporta en plantaciones ubicadas en la región de estudio crecimientos diamétricos de 1,3 a 1,6 cm/año para edades de 14 y 21 años, respectivamente. En otros estudios previos, Senilliani y Navall (2006) reportan ICA de 2 a 3 cm/año para

plantaciones jóvenes de 5 a 6 años mientras que para rodales de mayor edad (9 a 14 años) el ICA es de 1,3 a 1,5 cm/año, similares a los obtenidos en este estudio.

En relación al progreso del ICA e IMA en diámetro en cada sitio, los rodales que crecen en la mejor calidad (CI) con una densidad media (625 pl/ha) (FIGURA 33) parten con valores similares de ICA e IMA en los primeros años, con crecimientos promedios de 1,3 cm/año, indicando un ritmo inicial lento de incremento, similar al crecimiento de especies del Chaco semiárido como *Prosopis ruscifolia*, donde Giménez et al, (2009) registraron un ICA de 1,4 cm/año a los 9 años de edad o *Geoffreea decorticans* con valores de 1,18 cm/año a los 5 años (Giménez et al, 2013). La evolución del ICA para los primeros años no presenta un comportamiento exponencial que es típico de esta fase de crecimiento (Imaña y Encinas, 2008). Senilliani y Navall(2006) reportan mayores valores de crecimiento para algarrobo en esta etapa. Este comportamiento podría ser el resultado del efecto de podas periódicas en los 2 a 3 primeros años que si bien mejoran la calidad de fuste afectan al ritmo de crecimiento.

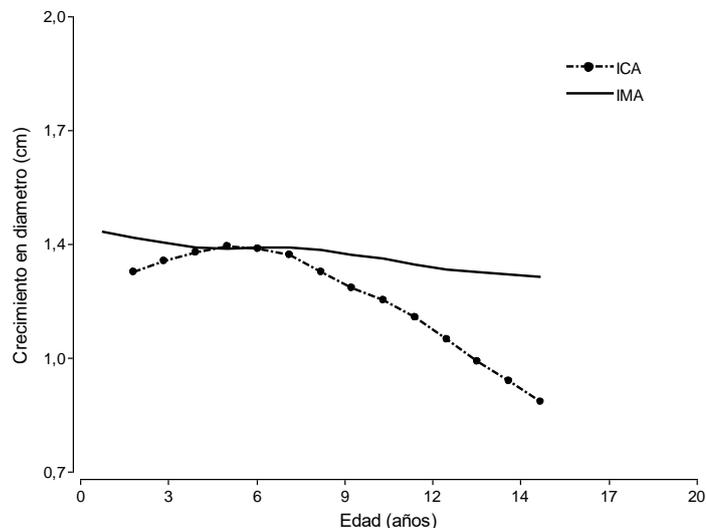


FIGURA 33: Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio I

Se observa además, que a una edad temprana (6 años) el ICA e IMA se cruzan y se produce el declinamiento en el ICA que puede estar dado por el inicio de la competencia y excesiva espesura por el cierre de copas. En base a este comportamiento se podría inferir que para la densidad de 625 arb/ha, en calidad de sitio I, la edad de 6 a 7 años podría considerarse como óptima desde un aspecto silvicultural para intervenir con el primer raleo e incentivar el crecimiento en el rodal. La sugerencia de un primer raleo en las condiciones

anteriormente enunciadas coinciden con estudios de Zárata (2017), quien cita que en rodales sin poda, el máximo IMA en diámetro se observa a la edad de 5 años con valores de entre 1,9 a 2,1 cm de diámetro en las menores densidades (de 450, 560 y 750 pl/ha), llegando a detener el crecimiento a los 7 años aproximadamente.

En rodales de calidad de sitio II, si bien el IMA es menor a la clase I, se plantean dos situaciones dependientes de la densidad inicial (FIGURA 34).

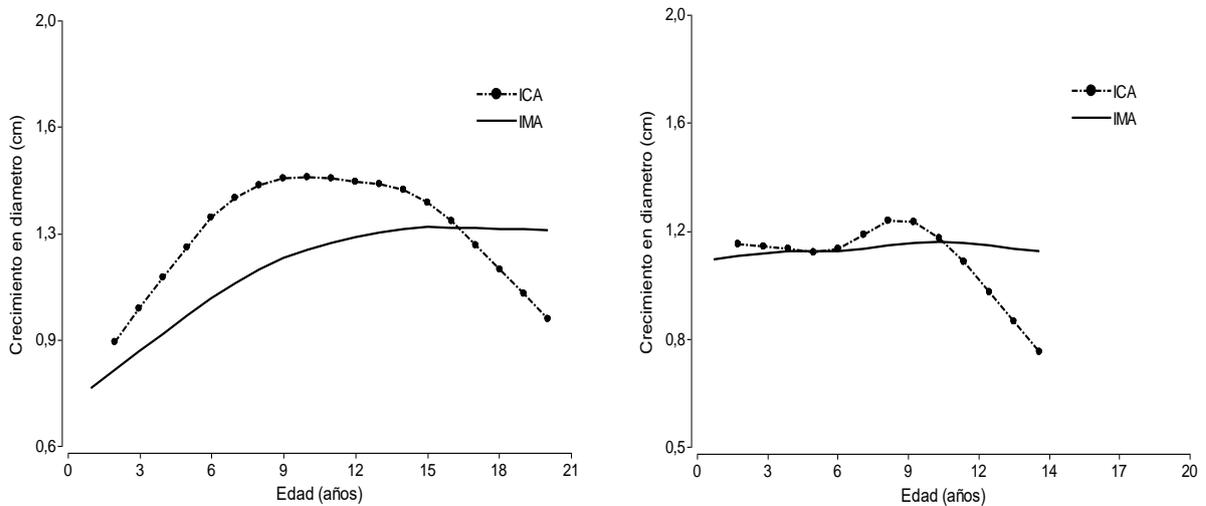


FIGURA 34: Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio II en rodales de diferentes densidades, 250pl/ha (izquierda) y 625 pl/ha (derecha).

Los rodales más densos (625 pl/ha), mantienen un ICA e IMA similares en la fase juvenil produciendo el cruce de ambos aproximadamente a los 9 a 10 años, indicando el cierre de copas e inicio de la competencia entre individuos, que luego genera la caída del ICA (Figura 34, derecha). Es evidente que el cierre de copas en este caso se ve retrasado en años, debido a que el potencial del sitio es menor.

Un comportamiento diferente es el observado en la clase II a bajas densidades (250 pl/ha) (Figura 34 izquierda), donde el ritmo del ICA es ascendente y superior al IMA en la fase juvenil, llegando a cruzarse recién aproximadamente a los 16 años, en contraposición a lo expresado por Rossi (2014) quien reporta edades más tempranas (9 a 10 años) para el punto de igualdad del IMA e ICA en el caso de plantaciones a baja densidad (250 pl/ha). El IMA no supera 1,3 cm/año, pero el ritmo de crecimiento del ICA respondería a un mayor

espaciamiento inicial entre individuos que permite un crecimiento exponencial en los primeros años para luego decrecer con la competencia.

En la clase III, se observa un escaso crecimiento, con ICA e IMA en descenso en la fase juvenil (FIGURA 35), pudiendo deberse a las condiciones desfavorables de crecimiento en los años iniciales, suelos salinos o salinos sódicos (sin lavado de sales). Esta situación mejora al 4° o 5° año del rodal, donde se estima que el sistema radicular alcanza la napa freática, impulsando el crecimiento nuevamente. En estos casos, el rodal hasta la edad de 12 años no logra llegar a la espesura normal.

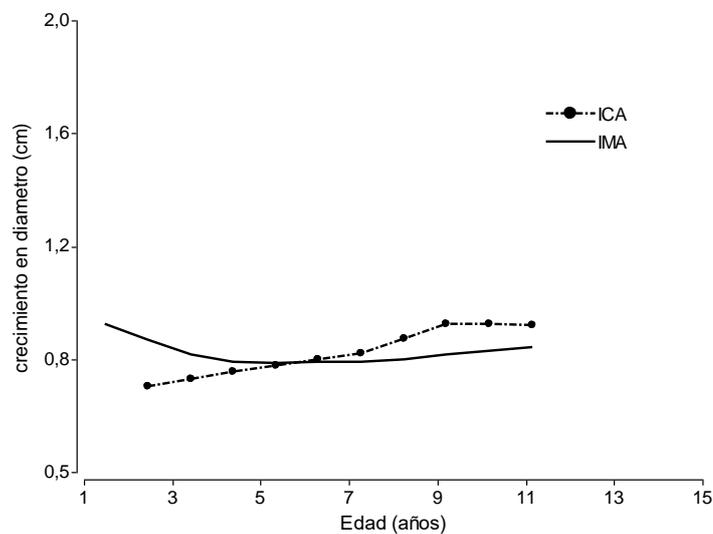


FIGURA 35: Incremento anual e incremento medio anual en diámetro para la clase de sitio III

En el progreso diferencial del ICA en diámetro para las clases I, II y III, se encontró que los rodales llegaron al máximo en menor tiempo en función de la calidad de sitio (FIGURA 36).

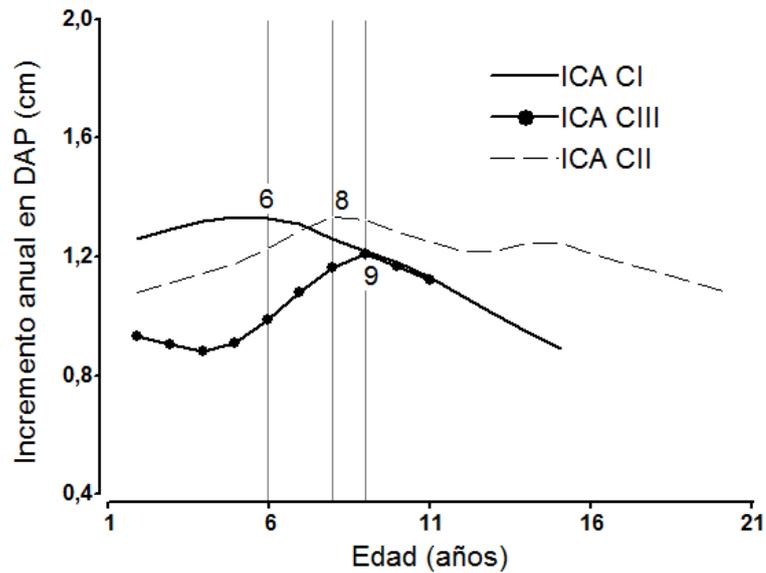


FIGURA 36: Incremento anual en diámetro para cada calidad de sitio, donde se señala la edad del ICA máximo con línea vertical.

4.4.1.2 Altura

En árboles individuales, el patrón de crecimiento sigmoideo característico en la relación Altura-edad, describe una curva con una etapa inicial (juvenil) con un crecimiento rápido y exponencial (FIGURA 37A). Imañas y Encina, (2008), refieren que la variable altura en muchas ocasiones produce la modificación más notoria en el crecimiento especialmente en esta fase, además de ser el parámetro que llega a su punto máximo antes que las demás variables dasométricas. Mientras transcurre la fase de madurez, la tasa de crecimiento en altura disminuye presentándose el máximo crecimiento hacia los 20 años aproximadamente. Analizando visualmente la altura en función del diámetro, se observó que la altura describe un ritmo de crecimiento ascendente hasta tender a estabilizarse alrededor de los 30 cm de DAP con aproximadamente 10 metros de altura (FIGURA 37 B).

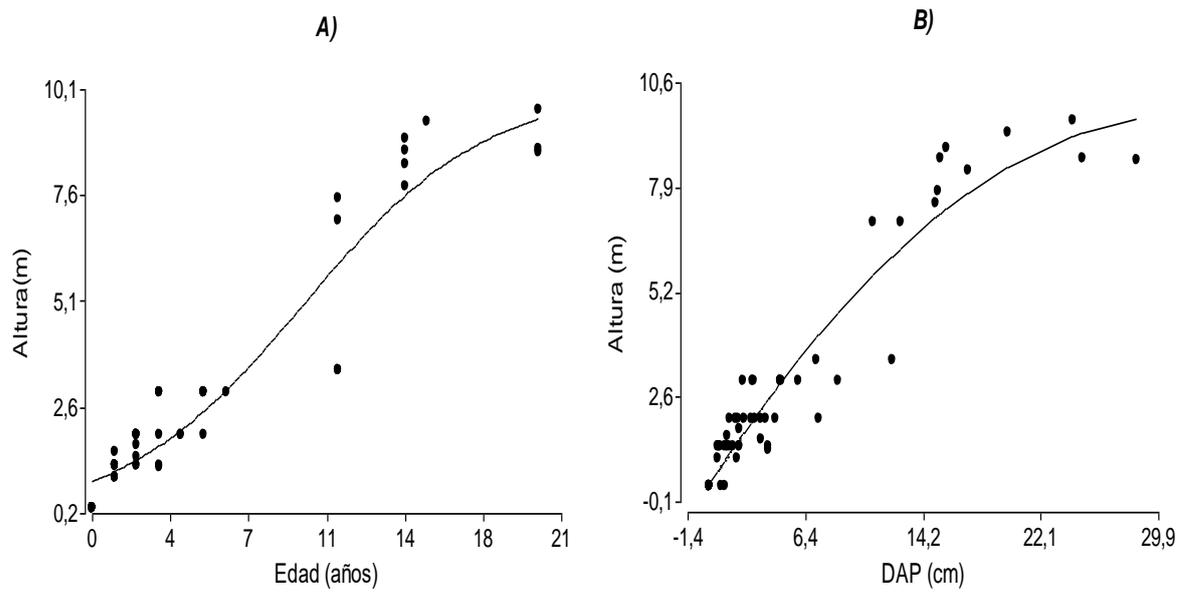


FIGURA 37 A) Curva de altura total (m) en función de la edad de los individuos y B) en función del DAP

Con relación al estudio de la especie en otras regiones del Chaco, Kees et al (2017) concluyeron que la evolución de la altura dominante en *Prosopis alba* en la provincia del Chaco tiende a estabilizarse en edades cercanas a los 25 años, que resultarían en una edad y registros de alturas levemente superiores a los encontrados en este estudio.

4.4.1.3 Volumen de fuste

El crecimiento en volumen de fuste presenta un esquema exponencial, típico de esta variable, marcando un ritmo diferencial para cada curva que se corresponde con árboles que han crecido en diferentes calidades de sitio y densidades (FIGURA 38).

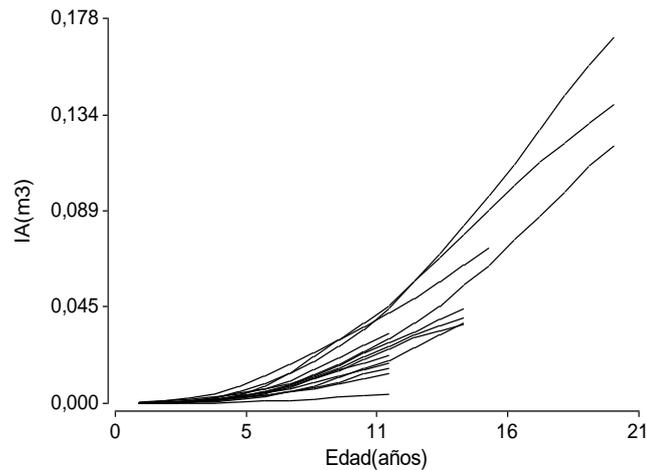


FIGURA 38: Incremento acumulado IA (m^3) en relación a la edad obtenido a partir del análisis epidométrico en 13 individuos.

En el incremento anual (ICA) en volumen, se visualiza una tasa de crecimiento más baja en los árboles de la clase III, en relación a los demás, coincidiendo con lo expresado para el diámetro (FIGURA 39). En el resto de los individuos, hasta el año 7 aproximadamente no se reportan grandes diferencias, el ritmo de crecimiento es parejo. A partir de allí la calidad de sitio y la competencia generan condiciones diferentes que resultan en el crecimiento volumétrico sostenido en los árboles de clase II a baja densidad (250 pl/ha) y los de clase I a densidad de 625 pl/ha que a partir de la ocupación efectiva del sitio (7 años) y la ausencia de raleo comienza a declinar el incremento. Los árboles de clase II con densidad de 625 pl/ha, presentan volúmenes menores aun, comenzando a declinar el incremento a mayor edad (aproximadamente 11 años).

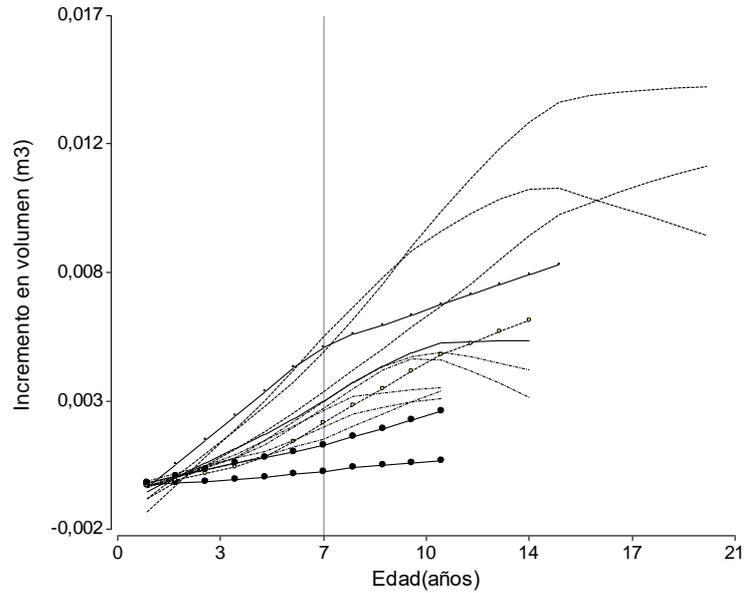


FIGURA 39: ICA en volumen (m³) en relación a la edad para arboles por clase de sitio y densidad inicial en el rodal. Curvas correspondientes a los arboles de clase II con densidad de 250 pl/ha (línea entrecortada), arboles de clase I con densidad 625 pl/ha (línea sólida), arboles de Clase II con densidad 625 pl/ha (línea entrecortada y punto) y arboles de clase III con densidad de 625 pl/ha (puntos).

En el análisis de la varianza para la variable ICA en volumen de fuste por calidad de sitio y densidad, se encontraron diferencias significativas (valor de F 10,17 p<0,0030), con volúmenes más altos para la clase I a 625 pl/ha y II a 250 pl/ha (Tabla 23).

TABLA 23: Valores promedio para el crecimiento en volumen de fuste (ICA) por densidad de plantación y clase de sitio a los 11 años.

| Variable | | Calidad de sitio | | |
|------------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------|
| | | I | II | III |
| | | 625pl/ha | 625pl/ha 250 pl/ha | 625 pl/ha |
| Volumen de fuste | ICA (m ³ /año) | 0,01 a | 3,7 x 10 ⁻³ b 0,01 a | 1,9x 10 ⁻³ b |

Es notable el efecto que tiene la ausencia de raleo en el crecimiento en el caso de los árboles de clase I. Probablemente de aplicarse esta tarea cultural se hubiera mantenido un crecimiento aproximado de 0,01m³/año en el año 14 o 15, donde se podría considerar un segundo raleo.

El volumen se encuentra altamente correlacionado al diámetro y se ve influenciado por diversos factores, entre ellos la densidad de plantación y la calidad del sitio. Se encontró que el incremento acumulado de volumen presenta una dinámica diferente para cada clase de sitio y densidades (FIGURA 40). El crecimiento es mayor cuando menor es la densidad y mejor es el sitio, considerando que el rodal no ha tenido raleos.

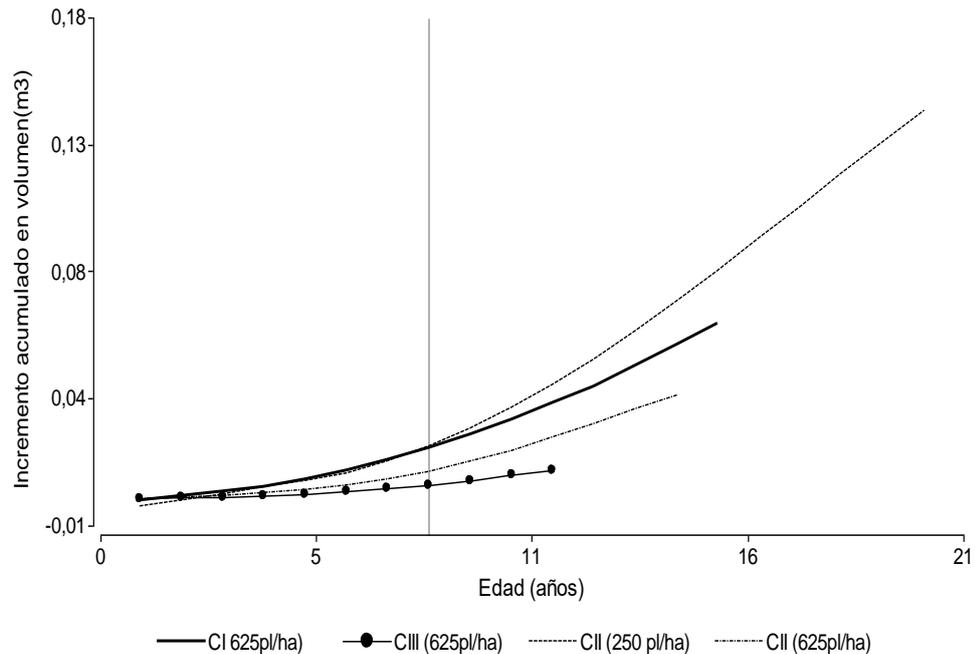


FIGURA 40 Incremento acumulado en volumen para cada clase de sitio y densidad de plantación, tomando de referencia la edad 8 señalada con una línea en la abscisa.

Se encontró que a los 8 años aproximadamente, es la edad a partir del cual el individuo reduce la tasa de crecimiento como resultado de la competencia y la falta de raleo, representando el punto a partir del cual se genera una posible pérdida en volumen. Este resultado surge de la comparación de la curva correspondiente a CI (625pl/ha) y CII (250pl/ha), donde el rodal en la mejor calidad de sitio a partir del año 8 reduce la tasa de crecimiento mientras el rodal en CII a menor densidad y sin competencia entre individuos sigue su crecimiento (FIGURA 40).

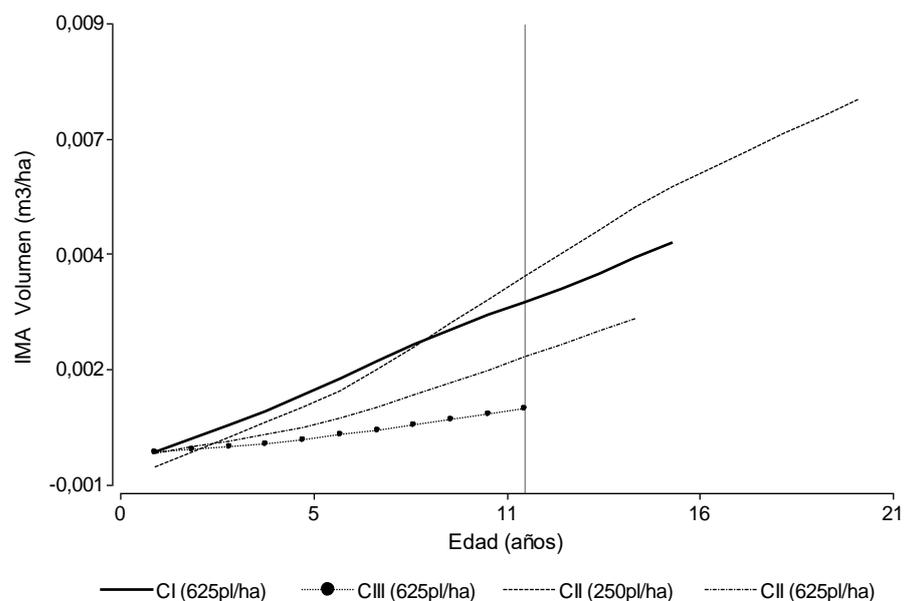
En general, se puede enunciar que los crecimientos en volumen varían por clase de sitio y con la densidad. A modo preliminar se indican valores promedio y rango de variación en metros cúbicos (Tabla 24) con el objetivo que sirva de orientación en el manejo en los rodales.

TABLA 24: Crecimiento en volumen ($m^3/ha/año$) por clase de sitio y densidad de plantación considerando la edad de 11 años.

| Calidad de sitio | Densidad (pl/ha) | Volumen ($m^3/ha/año$) | Rango ($m^3/ha/año$) |
|------------------|------------------|--------------------------|------------------------|
| I | 625 | 3,0 | 2,5 - 6,25 |
| II | 625 | 1,9 | 1,3 - 2,5 |
| II | 250 | 2,5 | 2,0 - 3,0 |
| III | 625 | 0,9 | 0,3 - 1,5 |

Los resultados del crecimiento en volumen son levemente inferiores a los encontrados por Zárate (2017) quien afirma que en un rodal bajo manejo forestal sostenido podría esperarse tasas de crecimiento volumétrico promedio de 2-4 $m^3/ha/año$, lo que para un turno de corta de 20 años en una hectárea podría producir entre 40 a 80 m^3 de madera de calidad a una densidad final de entre 100 a 120 árboles/ha.

Si se analiza la evolución del IMA en volumen con respecto a la edad (FIGURA 41) se observa que los rodales aún no han llegado al punto de máximo crecimiento, que normalmente indicaría el momento de máxima producción y edad óptima de rotación técnica del rodal. Se podría esperar un mayor rendimiento con el aumento de la edad y la aplicación de los tratamientos culturales necesarios en tiempo y forma.

**FIGURA 41:** Variación del IMA en volumen en relación a la edad por clase de sitio y densidad

4.4.1.4 Modelo de estimación del IMA e ICA en volumen de fuste del árbol

Se trabajó con la serie de datos de 11 individuos dominantes, ajustando modelos mixtos, tanto para IMA como ICA. Se probaron diferentes ecuaciones comúnmente usados por otros autores, resultando los modelos de mayor ajuste para IMA, el modelo no lineal de Weibull y para el ICA el modelo no lineal de Gompertz. Se presenta el ajuste de un modelo lineal para el DAP y se incorpora al gráfico para una mejor visualización del crecimiento (Tablas 25 y 26).

TABLA 25: Parámetros estimados y sus errores estándar para cada uno de los modelos ajustados para curvas de crecimiento en DAP y volumen (modelo 1 para DAP, modelo 2 para ICA en volumen y modelo 3 para ICA en volumen) en función de la edad de árboles de algarrobo en la región chaqueña semiárida

| Modelos mixtos ajustados | | α | β | δ |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|
| 1 | Modelo lineal | -0,68 ± 0,16 | 1,24 ± 0,02 | |
| 2 | Modelo no lineal Gompertz ICA | 0,02 ± 2,2 x 10 ⁻³ | 4,98 ± 0,18 | 0,14 ± 0,01 |
| 3 | Modelo no lineal Weibull IMA | 349,15 ± 27,9 | 1,7 ± 0,05 | |

TABLA 26: Criterios de bondad de ajuste de los modelos (modelo 1 para DAP, modelo 2 para ICA en volumen y modelo 3 para ICA en volumen)

| N° | Modelos | Modelos de Regresión Lineal mixto | | |
|----|---|--|---------|------------------------|
| | | AIC | BIC | σ |
| 1 | Lineal | | | |
| | DAP= $\alpha + \beta \cdot E$ R ² =0,96 | 408,8 | 479,8 | 0,59 |
| | | Modelo de Regresión no Lineal mixto | | |
| 2 | Gompertz ICA = $\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \exp(-\delta \cdot E))$ | -1767,7 | -1693,3 | 8,4 x 10 ⁻⁸ |
| 3 | Weibull IMA= $1 - \exp(-(E/\alpha)^\beta)$ | -2139,7 | -2063,4 | 6,7 x 10 ⁻⁹ |

Diversos autores estudiaron el crecimiento en *Prosopis* sp en formaciones naturales haciendo uso de modelos biológicos y lineales (Giménez et al., 2001; Juárez de Galíndez et al., 2008). Los resultados para el ICA e IMA coincidieron con Galíndez et al. (2005) quienes concluyen que en especies del género *Prosopis* tiene sentido mantener un modelo biológico que considere la disminución del crecimiento de los anillos después de llegar a un máximo.

Como se ha expresado en anteriores capítulos, los datos provenientes del análisis de crecimiento presentan situaciones de heterogeneidad de varianzas que se profundizan con la edad como también mayores probabilidades de correlación en los datos que provienen del mismo individuo (Carrero et al., 2008). En este caso se presentaron signos evidentes de heterocedasticidad y correlación, así lo demostró el análisis de los residuos estandarizados y los parámetros de correlación (Rho) obtenidos con valores cercanos a 1 (uno), expresando que existe correlación entre dos años consecutivos, razones por la cual se propusieron el uso de modelos mixtos que flexibilicen los supuestos de los modelos clásicos.

Según las medidas de ajuste analizadas, los modelos con mayor bondad de ajuste para las 3 variables IMA, ICA y DAP coinciden en ser Modelos mixtos con correlación de simetría compuesta teniendo en cuenta la calidad del sitio y correlación por árbol y varianza de los errores con función *varident* en relación a la edad. Los parámetros estimados fueron altamente significativos ($< 0,0001$) en todos los casos.

Se encontró la edad de culminación del crecimiento en volumen de fuste para el año 34, aproximadamente (FIGURA 42). Este valor máximo representa el turno según un criterio técnico-forestal de máxima producción continua, que podría ir cambiando en función de la calidad de sitio. Normalmente se verifica que a mejores calidades de sitio los turnos son más cortos (Coronel, 2015), con lo cual, si se realiza una buena evaluación del sitio a plantar, eligiendo la calidad I el turno sería menor. Se alcanza un DAP de 30 a 35 cm a la edad de 30 años, se podría sugerir la adopción como criterio de cortabilidad de un turno tecnológico a los 30 años (FIGURA 42).

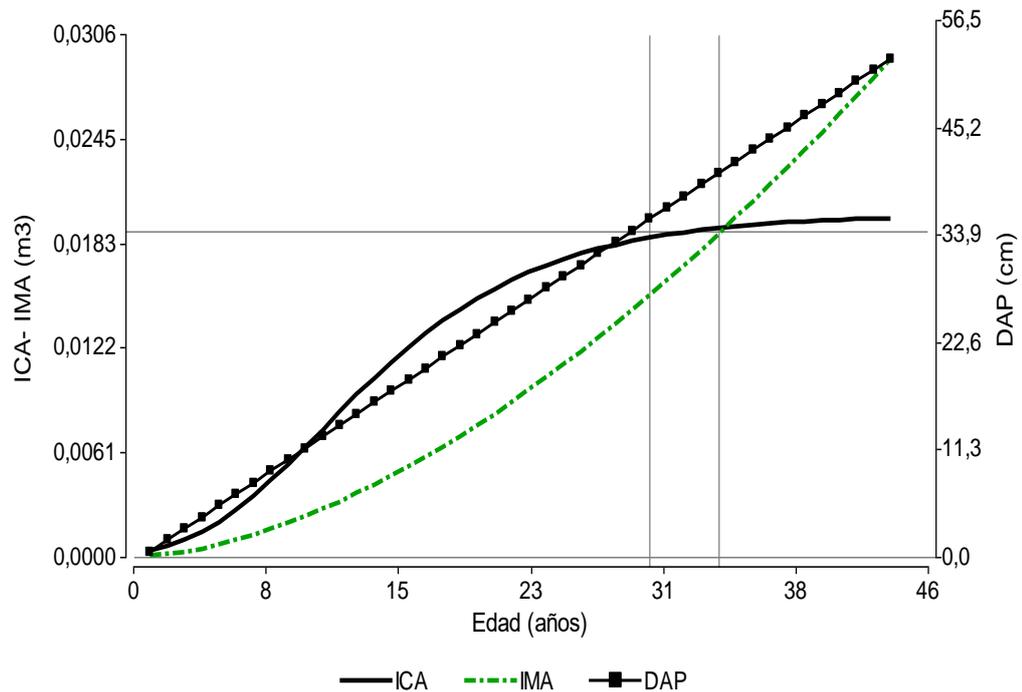


FIGURA 42: Proyección del DAP, ICA e IMA en volumen indicando mediante las líneas de referencia verticales, el máximo de productividad biológica para algarrobo blanco a los 34 años, un turno tecnológico a los 30 años y la línea de referencia horizontal que indica un DAP de 30cm.

Si bien son escasos los estudios que analicen el turno de corta para esta especie se reportan estudios similares en el Noreste de México, en plantaciones de *Prosopis glandulosa* y *Prosopis laevigata*, donde se registraron, tasas de crecimiento superiores a las registradas en comunidades naturales (Foroughbakhch et al., 2014), situación que se asemeja al comportamiento de *Prosopis alba* en nuestra región. Galíndez et al. (2005) estudiaron y analizaron la culminación del crecimiento en diámetro para *Prosopis alba* en rodales nativos. En dichos estudios, determinaron entre los 67 y 74 años la intersección del ICA e IMA en el espesor de anillos, lo que resultará seguramente en un máximo del volumen a mayor edad, ya que ambos crecimientos muestran cierto desfase. Los resultados que se obtuvieron en plantaciones podrían sugerir que el máximo punto de crecimiento en volumen con esta especie (34 años) representa la mitad del turno de rodales naturales de *Prosopis* y que según Martínez et al. (2017) la madera obtenida tanto de raleos como de corta final proveniente de plantaciones presenta igual o mejores valores en propiedades físico-mecánicas que árboles maduros de la misma especie extraídos del bosque nativo.

4.4.2 Crecimiento de rodales

4.4.2.1 Diámetro, área basal

Las variables DAP, Dg y AB muestran una alteración en el ritmo de crecimiento, a los 12 y 16 años, se estima que los rodales atraviesan períodos de competencia marcando la oportunidad de raleos (FIGURA 43).

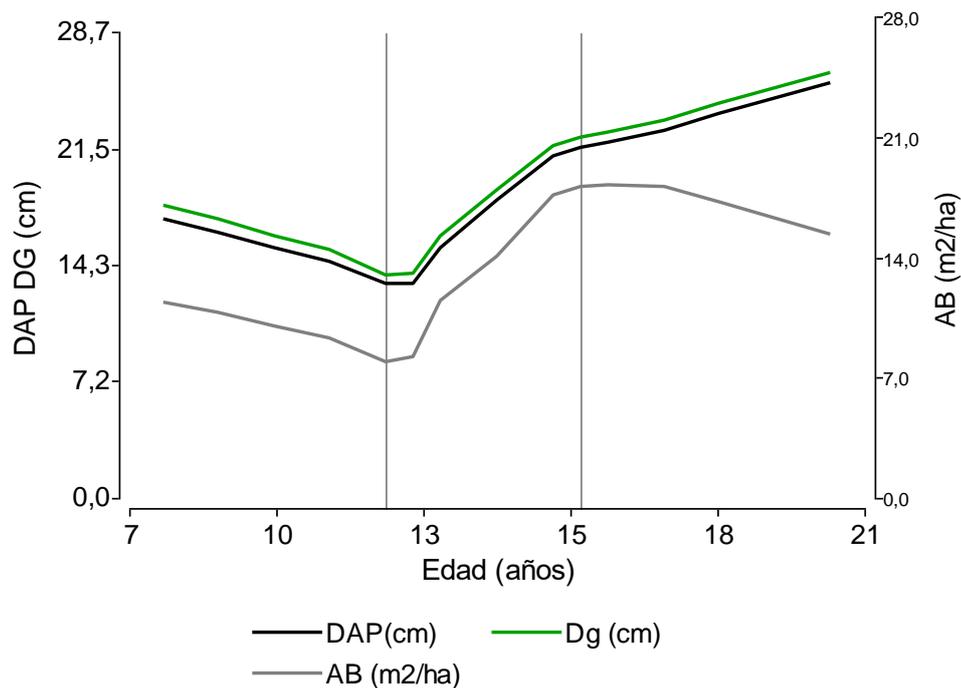


FIGURA 43: Crecimiento en diámetro a la altura de pecho (DAP), diámetro cuadrático (Dg) y Área basal (AB) de los rodales en relación a la edad. Se marcan dos líneas de referencia a los 12 y 16 años aproximadamente.

Como se ha expresado anteriormente, a partir de la ocupación efectiva del sitio aproximadamente a los 7 años comienza a declinar el crecimiento de los rodales ante la ausencia de raleo, con 12 m²/ha de AB se registran los primeros signos de competencia entre individuos, el AB disminuye hasta aproximadamente 9 m²/ha para luego retomar el crecimiento ascendente y llegar aproximadamente a 20 m²/ha a los 16 años, momento en el cual vuelve a descender. Cabe aclarar que el análisis comprende parcelas que han tenido raleos por lo bajo sin embargo el resto de rodales no han tenido raleos silvícolas, por lo tanto la respuesta por encima de los 11 años podría deberse a la liberación de recursos en la

competencia intraespecífica que se genera en el post-raleo. Sin embargo en los rodales no raleados se estima que por encima de esa edad hayan llegado a valores en el que se inicia un proceso de autorraleo o mortalidad natural, generándose una reestructuración de las copas dominantes y codominantes mortandad de pies oprimidos, enfermos, disminuyendo la densidad, permitiendo un nuevo incremento en AB hasta llegar a la espesura completa a los 16 años, donde se estima necesario un raleo comercial. Los resultados de crecimiento en diámetro obtenidos al momento en que se registra el inicio de la competencia entre individuos coinciden con Zárate (2017) quien expresa que *Prosopis alba* no crecerá más de 15 cm de diámetro en promedio si no se realizan tratamientos silvícolas. El diámetro medio (DAP) se comporta de forma similar al diámetro medio cuadrático (Dg), siendo este último levemente superior al DAP en todo el ciclo de crecimiento.

4.4.2.2 Altura total

La altura total en relación al DAP en los rodales presenta un crecimiento sensiblemente lineal (FIGURA 44), con un leve decrecimiento a partir de los 30 cm llegando a valores máximos promedios de entre los 7 y 12 m, aproximadamente. Esta evolución se presenta más aplanada que la referente a la Hd, que muestra mayores alturas.

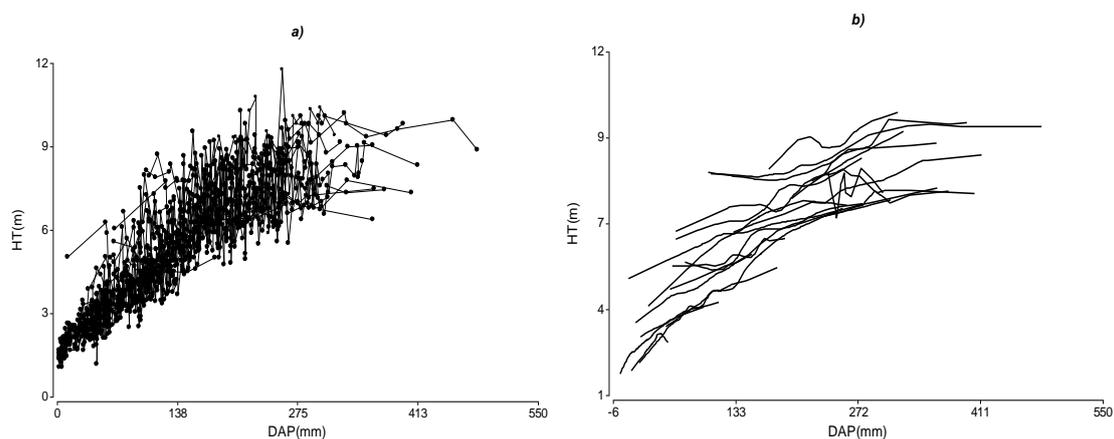


FIGURA 44: Relacion de crecimiento entre la altura total (m) y el DAP (mm) en rodales. a) Curva general de dispersión de datos b) curvas de HT-DAP por edad de la parcela

La altura total (HT) y el DAP tienen un papel importante en el modelado del crecimiento y producción de las masas forestales (Peng, 2001; Barrio Anta et al., 2004; Juárez de

Galindez et al., 2006; Juárez de Galindez et al., 2007). Una de las aplicaciones de la relación entre estas dos variables es la posibilidad de predecir la altura de los árboles en función del DAP, la variable de más fácil medición (Larsen y Hann, 1987; Aguilar Arias, 2004) y facilitar la tarea en la gestión forestal. Sin embargo, como la predicción de valores de alturas individuales en función únicamente del diámetro presenta limitaciones por la gran variación en las alturas a valores de diámetro similares, (Aguilar Arias, 2004), se realizó el ajuste de una curva HT-DAP generalizada. Se incluyen las variables calidad de sitio, densidad de los rodales y edad, todas ellas variables que pueden influir en la relación altura-diámetro. Cuando se incorporan variables del rodal dentro de un modelo para predecir alturas individuales, el poder de predicción mejora significativamente. Es más apropiada la aplicación de curvas de altura-diámetro generalizadas cuando se trata de masas forestales (Barrio Anta et al., 2004). Además, es interesante incluir el concepto de la aplicación de modelos mixtos como alternativa al ajuste de la regresión tradicional cuando las observaciones no son independientes entre sí. Diversos estudios han utilizado este tipo de modelos para desarrollar relaciones de alta precisión (Lappi 1997, Calama y Montero 2004, Sharma y Parton 2007, Trincado et al., 2007). Gómez García et al. (2014) comparo estos modelos en términos de capacidad predictiva y esfuerzo de muestreo, proporcionando así recomendaciones para el uso práctico, aplicados a la modelización del crecimiento.

Se ajustó un modelo lineal mixto para la altura total (HT) contemplando un efecto aleatorio de la edad por parcela, un efecto fijo de DAP, DAP^2 y la combinación de calidad de sitio y densidad como variables regresoras. La heterocedasticidad fue modelada para el factor densidad mediante la función *varident*.

$$HT = \alpha + \beta x DAP + \gamma x DAP^2 + sitio x densidad + \varepsilon_i [6]$$

En coincidencia con Calama y Montero, 2004 y Gómez García et al., 2014 en el uso de modelos mixtos alternativos a los modelos lineales generales, se determinó la ecuación generalizada HT-DAP [6].

El modelo ajustado es una función lineal polinómica de segundo grado, el coeficiente de regresión varía de 0,85 % a 0,91% y la σ residual es de 0,19 y CV de 6,62%, resultando el modelo altamente significativo.

Para cada uno de los términos de la interacción sitio x densidad y según el nivel de significancia obtenida ($p < 0,0001$), se generaron cinco ecuaciones:

$$H_{Cl_{555}} = 4,27 + 0,21xDAP - 3,3x10^{-3} xDAP^2 + 1,74$$

$$H_{Cl_{816}} = 4,27 + 0,21xDAP - 3,3x10^{-3} xDAP^2 + 1,87$$

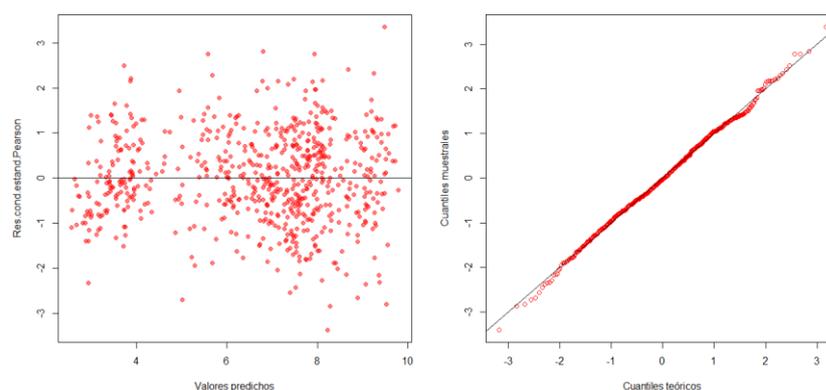
$$H_{Cl_{500}} = 4,27 + 0,21xDAP - 3,3x10^{-3} xDAP^2$$

$$H_{CIII_{500}} = 4,27 + 0,21xDAP - 3,3x10^{-3} xDAP^2 - 2,37$$

$$H_{CIII_{625}} = 4,27 + 0,21xDAP - 3,3x10^{-3} xDAP^2 - 1,08$$

Los residuos estudentizados vs predichos y el grafico Q-Q plot para el modelo clásico y el modelo mixto empleado, señalaron un leve patrón en forma de campana para el modelo clásico a causa de la falta de independendia en las observaciones, que es corregido con el uso del modelo mixto (FIGURA 45).

A)



B)

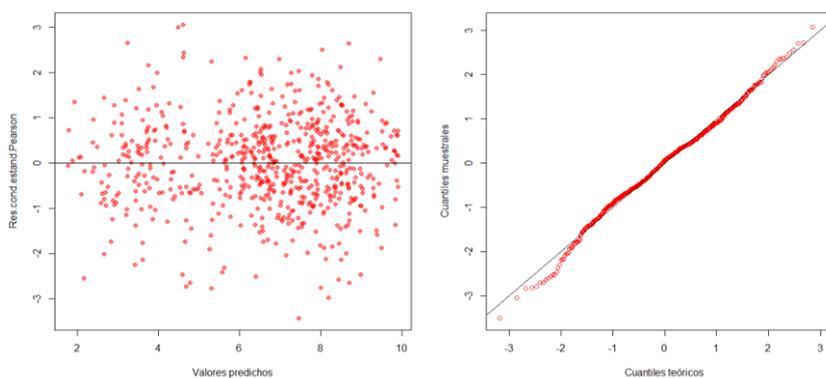


FIGURA 45. Residuos estudentizados vs. predichos y grafico Q-Q plot para A) modelo lineal clásico y B) modelo mixto de la ecuación generalizada de HT-DAP para *Prosopis alba*.

Validación del modelo

Los parámetros para evaluar la precisión de las ecuaciones indican errores aceptables para el modelo establecido a excepción de la ecuación $H_{CIII_{500}}$ que predice la altura con un error elevado (18,5%) y una DIFA % de 4,5 (Tabla 27), lo que significa que la función predictora subestima en 4 metros aproximadamente la altura. Se describe el RECM y la DIFA para cada una de las ecuaciones. El resto de las ecuaciones predicen la altura con errores aceptables.

TABLA 27: Parámetros que miden la precisión y el sesgo en la aplicación de la ecuación generalizada HT-DAP a partir del la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la diferencia agregada (DIFA).

| Ecuaciones | $H_{CI_{555}}$ | $H_{CI_{816}}$ | $H_{CI_{500}}$ | $H_{CIII_{500}}$ | $H_{CIII_{625}}$ |
|------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| RECM | 0,85 | 1,08 | 0,61 | 0,64 | 0,7 |
| RECM % | 9,79 | 11,7 | 9,25 | 18,5 | 12,5 |
| DIFA | -0,17 | 0,10 | -0,09 | 0,15 | 0,07 |
| DIFA % | -2,0 | 1,1 | -1,37 | 4,5 | 1,28 |

5. CONCLUSIONES

- Una primera aproximación en la estimación de la capacidad productiva de los sitios para *Prosopis alba* Griseb se expresa a partir de la familia de curvas anamórficas a la edad base de 15 años, representativas de tres calidades de sitio, I (buena), II (regular) y III (mala).
- El patrón de evolución en altura se ajusta satisfactoriamente al modelo Gompertz, adecuándose a los criterios biológicos de crecimiento. La especie estudiada culmina su crecimiento en altura a edades tempranas en el área de estudio, próxima a los 20 años, lo cual deberá corroborarse con estudios a edades más avanzadas.
- Los modelos no lineales mixtos han tenido mejor ajuste que los modelos lineales y no lineales clásicos de efectos fijos. Se concluye que habrá mayor precisión en la estimación del Índice de Sitio con el modelo de regresión no Lineal mixto de Gompertz, con estructura de correlación simetría compuesta y varianza de los errores con función de varianza exponencial.
- Las propiedades químicas del suelo que describen las condiciones de salinidad son determinantes en el crecimiento de *Prosopis alba*. El crecimiento se ve condicionado negativamente por encima de un umbral salino alterando la productividad de las masas forestales.
- La calidad nutritiva de las vainas de *Prosopis alba* está influenciada por las calidades de sitio más extremas (CI y CIII). Las vainas cosechadas en los rodales de más baja calidad

(calidad III) tienen menor contenido de azúcares y mayor porcentaje de lípidos que el sitio de mayor calidad (calidad I).

- La calidad del sitio no tiene gran influencia en el crecimiento en diámetro sin embargo el efecto de la menor densidad de plantación registra mayor ICA.
- En rodales con densidad de 625 arb/ha, de clase I se debe intervenir con el primer raleo, a la edad de 6 a 7 años y con Clase II, a partir del año 10. En rodales de baja densidad con Clase II (250 pl/ha) el momento oportuno de raleo sería en el año 16. En rodales de clase III, con densidad 625 pl/ha a los 12 años aún no se verifica el momento oportuno del 1° raleo.
- Los crecimientos en volumen del fuste en árboles individuales varían con la densidad y clase de sitio.
- La edad de culminación del crecimiento en volumen del fuste es de 34 años aproximadamente, en rodales sin manejo.
- El modelo predictivo HT-DAP generalizado, que incluye las variables calidad de sitio y densidad de los rodales, es una herramienta de utilidad para la gestión forestal.

6. RECOMENDACIONES

Para avanzar en una adecuada zonificación de la actividad de plantación con *Prosopis alba* se recomiendan las calidades de sitio I y II para forestación con fines de obtención de servicios de provisión (madera y frutos) y la calidad III, debido a su baja productividad, podría destinarse a la producción de frutos y servicios ecosistémicos de regulación, entre ellos la recuperación de áreas degradadas.

Es necesario aumentar la muestra de estudio en la evaluación potencial de los sitios incorporando mayor número de mediciones en parcelas permanentes de diferentes edades y sitios, e incorporar si se justificara el análisis de patrones polimórficos, que podría conferir mayor precisión en la estimación de las calidades de sitio.

Es necesario profundizar la investigación con respecto a la influencia de la edad de los rodales en la calidad de los frutos, ya que se visualiza una tendencia a encontrar mayores concentraciones de carbohidratos, FDT y menor proteína en rodales de mayor edad. Se recomienda profundizar esta línea de investigación incrementando la base de datos y los periodos de evaluación a través de varios años de cosecha.

Se recomienda tener en cuenta para la prescripción de raleo en plantaciones que el momento oportuno de esta tarea silvícola dependerá de la calidad de sitio y la densidad.

Los rendimientos en volumen de fuste tienen carácter exploratorio con el objetivo que sea de utilidad para orientar el manejo, debiendo limitar su aplicación preferentemente a los rangos de altura y edad abarcados en este estudio (3,5-9,6 m de altura y 11 a 20 años de edad).

Finalmente se considera importante avanzar en el estudio de la productividad de la especie en relación a la calidad de sitio teniendo como objeto de estudio plantaciones con manejo, lo que permitirá evaluar el potencial real de crecimiento independiente del factor de competencia.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Afif Khouri, E., Cámara Obregón, A., Álvarez Álvarez, P. y Barrio Anta, M. (2012). Factores edáficos de plantaciones jóvenes de "*Pinus pinaster*" Ait. en Asturias y su influencia en el crecimiento. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, ISSN 1575-2410, ISSN-e 2386-8368, N°. 35, 2012
- Aguilar Arias, D. (2004). Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 1(2), 1-10.
- Alder, D. (1980). "Forest volumen estimation and yield prediction FAO Forestry", 22 (2), 194 p.
- Amico, I., Bava, J. y Calderón, A. (2010). Índices de calidad de sitio de *Populus nigra* 'Italica' en plantaciones lineales en el noroeste de Chubut. *Rev. FCA UNCuyo* Tomo 42(1) 147-158.
Recuperado de http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/3537/t42-1-10-amico.pdf
- American Psychological Association (2010). Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (6 ed.). México, D.F.: Editorial El Manual Moderno.

- Andenmatten, E. y Letourneau, F. (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*, La Plata 103 (1) 69-75. Recuperado de <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/239>
- Apodaca, M., Crisci, J. y Katinas, L., (2015). Las provincias fitogeográficas de la República Argentina: definición y sus principales áreas protegidas. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/285578647>
- Arcos, N., Carabajal, W., Gelid, J., Herrera Coronel, J., Moyano, A., Pons, M., Salvadores, J., Galizzi, F., González, C. y Sánchez, M. (2013) Estudio de dos lotes cultivados con Algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Colonia El Simbolar (Santiago del Estero). III Jornadas sobre ciencia del suelo, Santiago del estero, Argentina.
- Assman, E. 1970. *The Principles of Forest Yield Study*. Oxford, UK, Pergamon Press. 506 pp. 24-26.
- Atanasio, M. (2012) Crecimiento de *Prosopis alba* Griseb sometido a diferentes intensidades de poda. Tesis de Maestría presentada a la Universidad Nacional de Misiones.
- Attis Beltrán, H., Chauchard, L. y Martínez Pastur, G. (2015). Curvas preliminares de Índice de Sitio para bosques puros y mixtos de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en la Patagonia Argentina. *BOSQUE* 36 (2): 275-285. DOI: 10.4067/S0717-92002015000200013.
- Balzarini, M., Macchiavelli, R. y Casanoves, F. (2005). Aplicaciones de modelos mixtos en agricultura y forestería. Notas de Clase. Curso Internacional Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Foresteria. CATIE. Turrialba, Costa Rica. Mimeo. 189 pp.
- Barrero Medel, H., Mothe, F., Nepveu, G., Álvarez-Lazo, C., García-Corona, I. y Guera, M. (2011). Curvas anamórficas de Índice de Sitio para plantaciones de *Pinus caribaea Morelet var. caribaea* Barret y Golfari, de la empresa Forestal Integral Macurije (EFI) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales*

y del Ambiente. 17 (2) 245-252. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62919277007>.

Barret, J. (1978) Height growth and site index curves for managed, even-aged stands of Ponderosa pine in the Pacific Northwest USDA forest service research paper pnw-232 Portland. Recuperado de https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_rp232.pdf

Barrio Anta, M., Alvarez Gonzalez, J., Diaz Marotto, I. y López Sánchez, C. (2004). Relación altura diámetro generalizada para *Quercus Robur* L. en Galicia. *Cuad. Soc. Esp. For* 18:141-146.

Bengoa, J. (1999). Estimación de la altura dominante de la masa a partir de la «altura dominante de parcela». Ventajas frente a la altura dominante de Assman. *Invest Agrar: Sist Recur For*, Fuera de Serie 1, 311-321.

Boeri, P., Piñuel, L., Sharry, S. y Barrio, D. (2017). Caracterización nutricional de la harina integral de algarroba (*Prosopis alpataco*) de la Norpatagonia Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 116 (1): 129-140.

Boetto, M. (1984). Estudio detallado de los suelos del centro educativo rural, Villa Zanjón. Propiedades, génesis, clasificación y evaluación con fines agropecuarios. (Manuscrito no publicado).

Calama Sainz, R. y Montero González. G. (2004). Aplicación de los modelos mixtos a un caso práctico de modelización del crecimiento y producción de las masas forestales. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For* 18: 317-321.

Cancino, J. (2006) *Dendrometría Básica*, Universidad de Concepción: Concepción, Chile. Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/407>

Capparelli, A. y Prates, L. (2015) Explotación de frutos de algarrobo (*prosopis spp.*) por grupos cazadores recolectores del Noreste de Patagonia. *Revista de Antropología Chilena* 47, (4) 549-563.

Carmean, W. (1975). Forest Site quality evaluation in the Unites state. *Adv. Agron.*27:209-269.

- Carrero, O., Jerez, M., Macchiavelli, R., Orlandoni, G. y Stock, J. (2008). Ajuste de curvas de Índice de Sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia*. 33 (4) 265-272. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933406>
- Carrillo Inungaray, M. y Reyes Munguía, A. (2013). Vida útil de los alimentos Lifetime food 2, (3) *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias Universidad Autónoma de San Luis Potosí*. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5063620.pdf>
- Censo Nacional Agropecuario, (1988).
- Choge, S., Pasiiecznik, N., Harvey, M., Wright, J., Awan, S. and Harris, P. (2007). *Prosopis* pods as human food, with special reference to Kenya#. Recuperado de <http://www.wrc.org.za>.
- Cisneros, A y Moglia, J. (2017). *Prosopis alba*, alternativa sustentable para zonas áridas y semiáridas. En: Los Bosques actuales del Chaco semiárido argentino. Ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva Parte III Propuestas productivas.
- Cleveland, W. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, (368) 829-836.
- Clutter, J., Fortson, J., Pienarr, L., Brister, G., and Bailey, R. (1983). En: Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley and Sons, New York, pp. 333.
- Córdoba, M. (2014). Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote. Tesis doctoral Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias Agropecuarias. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1493>
- Corona-Castuera, F., Gómez-Lorence, F., y Ramos-Ramírez, E. G., (2000). Análisis químicos proximales de la vaina de mezquite (*Prosopis torreyana*) en árboles podados y no podados en diferentes etapas de fructificación. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 1 (1) 21-28. <http://dx.doi.org/0000>

- Coronel, M. (2015). Determinación del turno forestal Bases teóricas y aplicaciones prácticas. Recuperado de: <https://www.unse.edu.ar/edunse/libros/coronel.pdf>
- Corvalán Vera, P. y Hernández Palma J. (2006). Densidad de rodal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Cátedra de Dasometría. Chile. 5 p. Recuperado de: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbXZxZW1hbmZvcmlhc3RlcXneDoxNzUzYTE5NzNIY2NkNWMy>.
- Crechi, E; Fassola, H.; Keller, A. y Barth, S. (2011). Desarrollo de funciones de Índice de Sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina". *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, Diciembre, 238-248.
- Daniels, T., Helms, J. y Baker, F. (1982). Principios de Silvicultura. México, MacGraw Hill.
- Davel, M. y Ortega, A. (2003). Estimación del Índice de Sitio para Pino oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia Andina Argentina. *Bosque* 24 (1), 55-69. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002003000100005>
- Decourt, N. (1973). Production primaire, production utile: méthodes d'évaluation, indices de productivité. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 30 (3), 219-237.
- Delgado-Caballero, C., Gómez-Guerrero, A. Valdez-Lazalde, J., De los Santos-Posadas, H., Fierros-González, A., & Horwath, W. (2009). Site index and soil properties in young plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in Southeastern Mexico. *Agrociencia*, 43(1), 61-72. Recuperado en 04 de marzo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000100007&lng=es&tlng=en.
- Derguy, M., Drozd, A., Arturi, M.F., Martinuzzi, S., Toledo, L. y Frangi, J. L. (2016). Aplicación del modelo de clasificación ecológica de Holdridge para la República Argentina a partir del análisis espacial de datos. XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica en Puerto Iguazú. Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA).
- De Souza Retslaff, F., Figueiredo Filho, A., Nogueira Dias, A., Gastão Bernett, L. y Figura, M. (2015). Curvas de sitio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na

região dos campos gerais, Paraná. *CERNE* 21 (2), 219 - 225.
<http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521021349>

Di Marco, E. 2013. *Prosopis alba* Griseb. (Algarrobo Blanco) (Familia Fabaceae, Mimosoideas). Ficha Técnica. Área Técnica Promoción Dirección de Producción Forestal MAGyP.

Recuperado de: forestindustria.magyp.gob.ar/archivos/procedimiento-requerido-en-plantaciones/prosopis-alba-griseb-familia-fabaceae-mimosoide.pdf

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. (2018). InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Escudero Álvarez, E. y González Sánchez. P. (2006). La fibra dietética. *Nutr. Hosp.* 21 (Supl. 2) 61-72. Recuperado de <http://scielo.isciii.es/pdf/nh/v21s2/original6.pdf>

Ewens, M. and Felker, P. (2010). A comparison of pod production and insect ratings of 12 elite *Prosopis alba* clones in a 5-year semi-arid Argentine field trial. *Forest Ecology and Management* 260 (3), 378–383. DOI: 10.1016 / j.foreco.2010.04.030

Fassola, H. y Wabo, E. (1993). Funciones de calidad de sitio para *Pinus elliotii* Engelm en Misiones (Argentina). *Revista Yvyrareta* (4), 26 – 34.

Fernández, R.; Crechi, E. y Friedl, R., (1994). Evaluación del comportamiento de la altura dominante como medida de la calidad de sitio para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. *Interciencia* 19 (6), 343-346. Recuperado de: <http://www.interciencia.org.ve>.

Ferraz Filho, A., Soares Scolforo, J., Ferreira, M., Maestri, R., de Assis, L., de Oliveira, A. y de Mello J. (2011). Dominant height projection model with the addition of environmental variables. *Cerne*, 17 (3), 427-433. DOI: 10.1590 / S0104-77602011000300018

Foroughbakhch R., Hernández-Piñero J. and Carrillo-Parra A. (2014). Adaptability, growth and firewood volume yield of multipurpose tree species in semiarid regions of Northeastern Mexico. *International Journal of Agricultural Policy and Research*. 2 (12), 444-453. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.016>

- Freyre, M., Astrada, E., Blasco, C., Baigorria, C., Rozycki, V. y Bernardi, C. (2003). Valores nutricionales de frutos de vinal (*Prosopis ruscifolia*): consumo humano y animal CYTA - *Journal of Food*, 4 (1), 41-46, DOI: 10.1080/11358120309487617.
- Gadow, K., Rojo Alboreca, A., Alvarez Gonzalez J., Rodriguez Soalleiro R., (1999) Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes temporales y de intervalo. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*: Fuera de Serie n° 1 - Diciembre 1999.
- Galera, F., (2000). Los Algarrobos. Las especies del género *Prosopis* (algarrobos) de América latina con especial énfasis en aquellas de interés económico. Córdoba, Argentina. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/AD314S/AD314S00.htm>
- Galizzi, F. (1992). Informe final de la Beca de Perfeccionamiento. CONICET. Inédito. 20 páginas.
- Galizzi, F., Angueira, C. y Prieto, D. (1998). Suelos de la Planta Piloto de drenaje del INTA Santiago del Estero. *Revista Quebracho* (7) (52-60). Recuperado de https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/q7_09.pdf
- Geetanjali, M. and Neera, G., (2008). Review. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiol Plant* 30 (5), 595–618 DOI: 10.1007 / s11738-008-0173-3
- GeoINTA.SAGyP – INTA – (2017) Proyecto PNUD ARG/85/019. Con la participación del Instituto de Suelos y EEAs del INTA. Versión Digital Corregida, Revisada y Aumentada (Versión 9.0): G. Cruzate, L. Gomez, M. J. Pizarro, P. Mercuri, S. Banchemo.
- Giménez, A. M., Ríos, N., Moglia, J. y López, C. (1998). Leño y corteza de *Prosopis alba* Griseb., algarrobo blanco, Mimosaceae, en relación con algunas magnitudes dendrométricas. *Bosque* 19(2): 53-62.
- Giménez, A. M., Ríos, N., Moglia, J.G., Hernández. P., y Bravo, S. (2001). Estudio de magnitudes Dendrométricas en función de la edad en *Prosopis alba* Griseb., algarrobo blanco, Mimosaceae. *Forest. Venez.* 45 (2), 175-183.

- Giménez, A.M., Ríos, N., Hernández, P., & Moglia, J. G. (2009). Influencia de la edad en el crecimiento de vinal (*Prosopis ruscifolia* Burkart.), en la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Madera y bosques*, 15(2), 45-57. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000200003&lng=es&tlng=es.
- Giménez, A. M., Hernández, P., Ríos, N. y Calatayu, F. (2013). Crecimiento de árboles individuales de *Geoffreea decorticans* Burk., en un bosque del Chaco semiárido, Argentina. *Madera y bosques*, 19 (1), 37-52. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000100004&lng=es&tlng=es.
- Godagnone, R. y De La Fuente, J. (2001). Regionalización Ecológica del NOA. Instituto de Suelos CIRN-INTA.
- Goitia, J.E. (1954). Estudio del incremento volumétrico de *Cupressus lusitanica* Mill en relación a la edad y al sitio. Tesis M.Sc. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 71 p.
- Gómez García, E., Dieguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F. and Crecente-Campo, F. (2014). A Comparison of Model Forms for the Development of Height-Diameter Relationships in Even-Aged Stands. *For. Sci.* 60 (3), 560–568 <http://dx.doi.org/10.5849/forsci.12-099>
- Greenway, H. and Munns, R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in Nonhalophytes. *Annu Rev. Plant Physiol.* 31:149–190. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.001053>
- Gutiérrez Espeleta, E. and Mize, C. W. (1993). A quantitative model for relating species and tropical forest sites: A synecological study. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 41(1), 7-21. Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/23298/23603>
- Habit, M., Contreras, D. y González, R. H. (1981). *Prosopis tamarugo*: arbustos forrajeros para zonas áridas. Estudio FAO. Producción y Protección vegetal 25, 143. Recuperado de <http://www.fao.org/3/AD318S/AD318S00.htm>

- Hach, C.C., Bowden, B.K., Kopelove, A.B. and Brayton, S. V. (1987). More powerful peroxide Kjeldahl digestion method. *Journal of Association of Analytical Chemist.*
- Hafeez, F., Aslam, Z. and Malik, K. (1988). Effect of Salinity and inoculation on growth, nitrogen fixation and nutrient uptake of *Vigna radiata* (L.) Wilczek. *Plant and Soil.* 106 (1), 3-8. <https://doi.org/10.1007/BF02371188>
- Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Muñoz-Flores, H. y Samperio-Jiménez, M. (2014). Índice de Sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6 (27), 24-37. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439020003>
- Herrera, B. (1996). Evaluación del efecto del sitio en la productividad de las poblaciones de dos especies dominantes en un bosque tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE Turrialba, Costa Rica, 152 p.
- Herrera, B. y Alvarado, A. (1998). Actualización- Calidad de sitio y factores ambientales en Bosques de Centro América. *Agronomía Costarricense* 22(1) 99-117. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/308202459_Calidad_de_sitio_y_factores_ambientales_en_bosques_de_Centro_America
- Imaña J. y Encinas O. (2008). 1° ed. Epidimetría forestal. Universidade de Brasilia, Departamento de Enghenaria Florestal y Universidad de Los Andes, Mérida, Facultad de Cs. Forestales.
- Jerez-Rico, M., Moret-Barillas, A., Carrero-Gámez, O., Macchiavelli, R. y Quevedo-Rojas, A. (2011). Curvas de Índice de Sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L. f.) en los llanos de Venezuela. *Agrociencia.* 45 (1): 135-145.
- Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30219760012>
- Juárez de Galindez, M., Giménez, A., Ríos, N. y Balzarini, M. (2005). Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb empleando dos modelos biológicos. *Revista Quebracho* 12, 34-42.

Juárez de Galíndez, M., Pece, M., Gaillard de Benítez, C., Sanguedolce, J., Mariot, V. y Mazzuco, R. (2006). Ecuaciones altura-diámetro para *Zyxphus mistol*, Griseb en Santiago del Estero, Argentina. *Revista Quebracho* (13), 36-43. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/481/48101304.pdf>

Juárez de Galíndez, M., Pece, M., Gaillard de Benítez, C., Sanguedolce, J., Mariot, V. y Mazzuco, R. (2007). Ecuaciones altura-diámetro en *Prosopis nigra* (Griseb) Hieron (algarrobo negro) en Santiago del Estero, Argentina. *Foresta Veracruzana*, 9, (1), 9-14. Recursos Genéticos Forestales Xalapa, México. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/497/49790102.pdf>

Juárez de Galíndez, M., Giménez, A. M., Ríos, N. y Balzarini, M. (2008). Determinación de la edad de aprovechamiento de individuos de *Prosopis alba* mediante un modelo logístico de intercepto aleatorio para incrementos radiales. *INFOR*, Chile. Recuperado de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/18818>

Kees, S., Michela, J. y Skoko, J. (2017). Curvas de Índice de Sitio para *Prosopis alba* en la provincia del Chaco. *Revista Forestal Iyvrareta* 24, 2017. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_curvas_de_indice_de_sitio_para_prosopis_alba_en_la_provincia_de_chaco.pdf

Kees, S., López, A., Rojas, J., Roldán, M., Zurita, J. y Brest, E. (2017). Características edáficas y su relación con la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba* en la provincia del Chaco *Revista Forestal Iyvrareta* 24, 17-19.

Kees, S. Michela, J., Skoko, J., Lupi, A. y Ferrere, P. (2018). Producción y crecimiento de las plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en la Provincia del Chaco, *RIA*, (En prensa). Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_produccion_y_crecimiento_de_las_plantaciones_de_prosopis_alba_griseb._en_la_prov_chaco.pdf

Kramer, P.J. and Kozlowski, T.T. (1979). *Physiology of woody plants*. Academic Press, 811 pp.

Kramer H. (1959). Die oberhohe als bestandesmerkmal. *Allg. Forst-jagdztg* 130, 241-255

- Kramer H. (1961) Die Verwendung die oberhohe in der Forsteinrichtung Allg. Forst-jagdztg 132, 122-129.
- Larsen, D.R. and Hann, D.W. (1987). Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Res. Paper N° 49.
Recuperado de <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/xw42n914w>
- Ledesma, T., de Bedia, G. y López, C. (2008). Productividad de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero. *Quebracho 15* (5-9). Recuperado de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/ne-a01.pdf>
- Lencinas, M.V, Martínez Pastur, G., Cellini, J.M, Vukasovic, R., Peri, P., Fernández, M.C (2002). Incorporación de la altura dominante y la clase de sitio a ecuaciones estándar de volumen para *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted *Bosque*, Vol. 23 N° 2, pp. 5-17
- López, C. (2005). Evaluación de la Variación Genética de Especies del Género *Prosopis* de la Región Chaqueña Argentina para su Conservación y Mejoramiento. Capítulo III: Mejores Árboles para más Forestadores. Editor: Carlos Norberto, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca Pag. 195- 203. Buenos Aires. ISBN: 9879184475.
- Lorenz, G. (2005) Métodos de análisis de suelos. Serie didáctica N°12 Cátedra de Edafología Forestal. Facultad de Cs, Forestales UNSE.
- Machado, S., de Souza, R., Jaskiu, E., Cavalheiro R. (2011). Construction of site curves for native *Mimosa scabrella* stands in the metropolitan region of Curitiba. *Cerne* 17(4):489-497 DOI:10.1590/S0104-77602011000400007
- Maldonado, A. Salim, V. y López, C., (2001). Variación genética de progenies de *Prosopis alba*. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales 10* (1), 59–68
Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=165090>
- Mares Arreola, O., Cornejo Oviedo, E., Valencia Manzo, S. y Flores López, C., (2004). Índice de Sitio para *Pinus Herrerae* Martinez en CD Hidalgo Michoacan. *Rev. Fitotec. Mex*, 27 (Num. especial 1), 77-80. Recuperado de <https://www.redalyc.org/html/610/61009916/>

- Martínez Pastur, G., Lencinas, M.V., Cellini, I.M., Díaz, B., Peri, P., Vukasovic, R. (2002) Herramientas disponibles para la construcción de un modelo de producción para la lenga (*Nothofagus pumilio*) bajo manejo en un gradiente de calidades de sitio *Bosque*, Vol. 23 N° 2, pp. 69-80. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200008>
- Martínez, R., Ewens, M., Schimpf, R., Ruiz, A. y Benitez, F. (2017). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de corta final de *Prosopis alba* Griseb. *Foresta veracruzana* 19, (1), Recursos genéticos forestales. Recuperado de <http://www.redalyc.org/jatsRepo/497/49751522004/html/index.html>
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L., De-la-Cruz-Arias, V. y Álvarez-Martínez, J., (2015). Índice de Sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 38 (4) 415-425. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400010&lng=es&tlng=es
- Meglioli, P. A. (2009). Parámetros morfológicos y digestibilidad del fruto Lámbar (*Prosopis alpataco* var. *alpataco* Philippi) y su importancia como recurso alimenticio. Tesis de grado. Licenciatura en Biología-Orientación en Ecología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan.
- Mellado T., (2012). Influencia de los parámetros edáficos, topográficos y climáticos sobre el Índice de Sitio de *Pinus sylvestris* L. en las masas de León y Palencia. Tesis de Maestría de la Universidad de Valladolid, España.
- Meloni, D., Gulotta, M., Martínez, C. y Oliva, M. (2004). The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba* Braz. *J. Plant Physiol.* 16 (1), 39-46. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202004000100006>.
- Méndez Paiz, B. y Vanegas Chacón, E. (2016). Factores de sitio y crecimiento de plantaciones de Palo Blanco (*Tabebuia donnel-smithii* Rose) en Guatemala. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 4, (2). Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5768632>

- Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. y Rudy, L. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense* 29 (1), 67-75. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/436/43629107/index.html>
- Montero, G., Grau, J.M., Ruiz-Peinado, R., Ortega, C. y Cañellas, I. (2000). Tablas de producción para *Pinus halepensis* Mill. La selvicultura del Pino Carrasco. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 10, 183-188.
- Montero Mata, M., (1999). Tesis de Magister: "Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica". Universidad Austral de Chile.
- Montero G., I. Cañellas y R. Ruíz-Peinado (2001) Growth and yields models for *Pinus halepensis* Mill. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 10 (1), DOI: 10.5424 / 720
- Morello, J. (2012). Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Morello, J.; S. Matteucci; A. Rodríguez (eds.) 1ª ed. Orientación Grafica Editora, Buenos Aires. 752 p.; 26 x 17 cm. ISBN 978-987-1922-00-0.
- Navall, M. y Senilliani, M.G., (2004). Crecimiento y calidad maderera de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb (Algarrobo blanco) en el área de riego del Rio Dulce, provincia de Santiago del Estero. XIX Jornadas Forestales de Entre Rios. Argentina.
- Navall, M., Ewens, M., Senilliani, M.G. y López, C. (2015). Efectos de la poda en plantaciones jóvenes de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero, Argentina. *Revista Quebracho* 23 (1, 2):77-91. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/481/48145593007.pdf>
- Oduol, P., Felker, P., Craig, R. and Mckinley, C. M. (1986). Variation among Selected *Prosopis* Families for Pod Sugar and Pod Protein Contents. *Forest Ecology and Management*, 16 423-431. Recuperado de <http://www.bashanfoundation.org/contributions/Felker-P/felkerpodsugar.pdf>
- Oficial Methods of Analysis of the Association of Oficial Analytical Chemists AOAC. (1995). (16th ed.). Arlingtong, Virginia, USA.

Ortega, A. y Montero, G. 1988. Evaluación de la calidad de sitio de las estaciones forestales. *Revisión bibliográfica. Ecología (Esp) (2):155-184*. Recuperado de <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/...forestales/.../14896>

Page A.L (Ed) 1982. *Methods of soils analysis. Part I and II* Madison Wis., American Society of Agronomic.

Pasiecznik, N., Harris, P., and Smith, S. (2004). *Identifying Tropical Prosopis Species: A Field Guide* N. HDRA, Coventry, UK. Recuperado de <https://gardenorganic.org.uk/sites/www...org.uk/files/.../IdentifyingProsopisGuide.pdf>

Peng, C. (2001). Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forest. *Northern Journal of Applied Forestry*, 18, 87–94. doi: <https://doi.org/10.1093/njaf/18.3.87>

Pérez, V., Vicentini, G., Ocampo, L. y Vega, C. (2011). Evaluación preliminar de la calidad de sitio para *Prosopis alba* Griseb mediante la utilización de criterios dasométricos. 1° Congreso Forestal del Gran Chaco Sudamericano. *Producción y Sustentabilidad*. 11 p. ISSN 1853-5755.

Perpiñal, E., Balzarini, M., Catalán, L., Pietrarelli, L. y Karlin, U. (1995). Edad de culminación del crecimiento en *Prosopis flexuosa* D.C. en el Chaco Árido Argentino. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*. 4(1), 45-55.

Pezzutti, R. (2014). Silvicultura sitio específica, una herramienta para ajustar el manejo a la capacidad productiva del sitio. XXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos.

Prieto, D., Angella, G., Angueira, C., Pérez Carrera, A. y Moscuza, C. (2005). Indicadores de desempeño del Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. *El agua en Iberoamérica, Uso y Gestión del Agua en Tierras Secas*. Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. ISBN 987-43-81-7, Mendoza

Prieto D. 2014. Comunicación personal

- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997). *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible.* San José, Costa Rica. 561 p.
- Prokopiuk, D., Cruz, G., Grados, N., Garro, O. y Chiralt A. (2000). Estudio comparativo entre frutos de *Prosopis alba* y *Prosopis pallida*. *Multequina* 9, 35- 45. Recuperado de https://www.academia.edu/9593310/estudio_comparativo_entre_frutos_de_prosopis_alba_y_prosopis_pallida_comparative_study_among_the_fruits_of_prosopis_alba_and_prosopis_pallida
- Prosky, L., and Lee, S. C. (1996). Dietary Fiber and Its Applications: Definitions, Analytical Methods and Their Applications. *Natural Antioxidants and Food Quality in Atherosclerosis and Cancer Prevention*, (5), 303–310. <https://doi.org/10.1533/9780857093059.303>
- Qadir, M., Tubeileh, A., Akhtar, J., Larbi, A., Minhas, P.S. and Khan, M.A. (2008). Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification. *Land degradation & development*, 19, 429–453 DOI: 10.1002/ldr
- Red Agro forestal REDAF, (1999). Estudio Integral de la Región del Parque Chaqueño. Informe General Ambiental Red Agroforestal Chaco Argentina. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas Préstamo BIRF N° 4085.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F., (1999). Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Food & Agriculture Org. FAO irrigation and drainage paper*, 57. Recuperado de <http://www.fao.org/3/x2002e/x2002e.pdf>
- Ribeiro, A., Ferraz Filho, A., Tomé, M. and Soares Scolforo, J. (2016). Site quality curves for *African mahogany* plantations in Brazil. *Revista CERNE* 22 (4) 439-448. DOI: 10.1590/01047760201622042185
- Ríos, N.A., Giménez, A. M. y Moglia, J. G. (2001). Crecimiento del itín (*Prosopis kuntzei* Harms) en la Región Chaqueña Argentina. *Madera y Bosques* 7(1), 47-56. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711318>

- Rodrigues, M., Corá, J., Castrignanò, A., Mueller, T. y Rienzi, E. (2013). A Spatial and Temporal Prediction Model of Corn Grain Yield as a Function of Soil Attributes. *Agron. J.* 105 (6): 1878–1887. DOI: 10.2134/agronj2012.0456
- Rojo Alboreca, A., Cabanillas-Saldaña, A., Barrio Anta, M., Notivol-Paino, E., and Gorgoso-Varela J. (2017). Site index curves for natural Aleppo Pine forest in the Central Ebro Valley (Spain) *Madera y Bosques*, 23 (1), 143-159. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.231495>
- Rondeux, J. (2010). Medición de árboles y masas forestales Trad. Barrionuevo A. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Rossi, F. (2014). Crecimiento de ejemplares juveniles de *Prosopis alba* Griseb en plantaciones del Chaco Semiárido argentino. Tesis vocacional de grado FCF-UNSE.
- Salto, C., Harrand, L., Oberschelp, G. y Ewens, M. (2016). Crecimiento de plantines de *Prosopis alba* en diferentes sustratos, contenedores y condiciones de vivero. *Bosque* 37(3), 527-537. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000300010>
- Salazar Zarzosa, P. (2018). Variabilidad funcional de *Prosopis pallida* frente a factores climáticos y edáficos en un gradiente ambiental en la costa norte de Perú. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba, España.
- Sánchez, R., Dunel Guerra, L. y Scherger, M. (2016). Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. 1a ed. Hilario Ascasubi, Buenos Aires: Ediciones INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_h._ascasubi-estimacion-areas-salinas-argentina_2016.pdf
- Sarmiento, G. (1963). Las comunidades vegetales del Chaco semiárido santiagueño. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires.
- Sarmiento M. y Villarreal, M. (2015). Principales limitaciones en la producción y comercialización de harinas de frutos del monte nativo entre asociaciones de productores en Santiago del Estero, Argentina. IX Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales Argentinos y Latinoamericanos, 3 al 6 noviembre de 2015 Facultad de Ciencias Económicas de la UBA Buenos Aires Argentina.

- SAyDS, (2018). Series estadísticas forestales 2010-2016. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/series_2010-2016_1.pdf
- Scambato, A. (2013). Influencia de la simbiosis con micorrizas arbusculares y rizobios sobre el crecimiento y la tolerancia a estrés salino en especies forestales de *Prosopis*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires.
- Schabenberger, O. and Pierce, F. (2002). Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences. CRC Press. EEUU.
- Schlatter, J. (1991). Fertilidad del suelo, Concepto y su Aplicación a la Producción Forestal. XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Carlos de Bariloche, Argentina, Abril de 1991.
- Schlatter, J. (1994). Requerimientos de sitio para Lengua, *Nothofagus pumilio*. *Bosque* 15: (2) 3-10
- Schlatter, J. y Gerding, V., (1995). Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque* 16 (2), 13-20.
- Schlatter, J. y Gerding, V. (2014). Sitio Forestal. Donoso C., M.E González, A. Lara. Eds. Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y la conservación de los bosques nativos de Chile. Valdivia, Chile Ediciones UACH p. 309-319.
- Sciammaro, L., Ferrero, C. and Puppo, M. (2015). Chemical and nutritional properties of different fractions of *Prosopis alba* pods and seeds. *Food Measure* DOI 10.1007/s11694-015-9282-z
- Senilliani, MG. y Navall, M. (2006). Parámetros dasométricos de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb (algarrobo blanco) del área de riego de la Provincia de Santiago del Estero, II Jornadas Forestales de Santiago del Estero on CD ROM con registro ISSN 1669-5070, Santiago del Estero.
- Silva M.P., Martínez, M. J., Coirini, R., Brunetti, M. A., Balzarini, M. y Karlin, U. (2000). Valoración nutritiva del fruto del algarrobo blanco (*prosopis chilensis*) bajo distintos

- tipos de almacenamiento. *Multequina* 9, 65-74. Recuperado de https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//multequina/indice/pdf/09/9_7-Silva.pdf
- Sharma, M. and Parton, J. (2007). Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 249(3), 187-198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.006>
- Skovsgaard, J. and Vanclay, J. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands *Forestry*, Vol. 81, No. 1, 2008. doi:10.1093/forestry/cpm041
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Surco Almendras, J.C. y Alvarado Kirigin, J.A. (2010). Harinas Compuestas de Sorgo-Trigo para Panificación. *Rev. Bol. Quim.* 27 (1) 19-28 Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602010000100004
- Taleisnik, E. y López Launestein, D. (2011). Leñosas perennes para ambientes afectados por salinidad. Una sinopsis de la contribución argentina a este tema. *Ecología Austral* 21 (1), 3-14.
- Thrower, J. (1986). Estimating Site Quality from Early Height Growth of White Spruce and Red Pine Plantations in the Thunder Bay area. Tesis de maestría. Lakehead University, Ontario.
- Toll Vera, J.R., Martín, G.O. (h), Nicosia, M.G., Fernández, M.M., Olea, L.E., González Coletti, A. y Agüero, S.N. (2016). Sobrevivencia de plantines de algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.) en suelos salinos y salino-sódicos del Departamento Río Hondo, Santiago del Estero. *Rev. Agron. Noroeste Argent.* 36 (1), 57-63. Recuperado de <http://www.faz.unt.edu.ar/ranar/ranar3618.pdf>
- Trincado, G., Curtis, I.V. and Burkhart, H. E. (2007). Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *Eur. J. Forest. Res.* 126:253–262. DOI 10.1007/s10342-006-0141-7

- Vaides, E., Ugalde, L. y Galloway, G. (2004). Comunicación técnica: Crecimiento y Productividad de Teca (*Tectona Grandis* L.F) en Plantaciones Forestales Jóvenes en Guatemala. *Recursos Naturales y Ambiente/no. 46-47:137-145.*
- Valdés M., Stiff, Ch. y Dechert, T. V. (1994). Determinación de calidad de sitio y productividad del *Pinus oocarpa* en base a características ambientales en la zona central de Honduras. *Interciencia 19(6): 336-342.* URL: <http://www.interciencia.org.ve>
- Valle Arango, J. (1993). La predicción del sitio forestal para especies que se plantan en el trópico *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín. 46 (1y 2), 47-69.* Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/29819/1/28490-102421-1-PB.pdf>
- Vicentini G. y Pérez, V. (2011). Primeras evaluaciones de los efectos del suelo en forestaciones de *Prosopis alba* Gris. de la provincia de Formosa (Argentina). 1° Congreso Forestal del Gran Chaco Sudamericano.
- Villagra, P. (2000) Aspectos ecológicos de los algarrobales argentinos. *Multequina 9 (2), 35-51.* Recuperado de https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//multequina/indice/pdf/09_02/9_2_3.pdf
- Villagra, P., Vilela, A., Giordano, C. and Álvarez, J. (2010). Ecophysiology of *Prosopis* species from the arid lands of Argentina: what do we know about adaptation to stressful environments? Pp. 321-340 en: Ramawat, KG (ed.). *Desert Plants.* Springer. Berlin. Germany.
- Villalba, R. (1988). Dendrocronología: su aplicación al manejo dasonómico de los algarrobales. *Prosopis en la Argentina.* Inédito.
- Villalba, R., Villagra, P.E., Boninsegna, J.A., Morales, M.S. y Moyano, V. (2000). Dendroecología y dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. *Multequina 9 (2), 1-18.* Recuperado de https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//multequina/indice/pdf/09_02/9_2_1.pdf
- Ypushima-Pinedo, A., Salcedo Pérez, E., Manríquez González, R., Silva Guzmán, J., Zamora, Nátera J. y Hernández Álvarez, E. (2014). Propiedades de la madera y relación del estado nutricional con el crecimiento en Teca. *Revista mexicana de ciencias forestales, 5(24), 26-39.*

West, B., Welch, K., Galecki, A. (2006). Linear Mixed Models. A Practical guide Using Statistical Software. Second Edition. CRC Press.

Zarate M. (2017). 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 para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Recursos Naturales.

Zolfaghari, R., Harden, M. and Huffmay, I. (1986). Some physical and chemical properties of honey mesquite pod (*Prosopis glandulosa*) and applications in food products. *Cereal Chemistry*. 63: (2), 104-108. Recuperado de https://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1986/Documents/chem63_104.pdf