

NOTA TÉCNICA

Estimación del volumen de fuste en un raleo comercial en plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero

Estimating stem volume from a commercial thinning in plantations of Prosopis alba Griseb in Santiago del Estero

Senilliani M. G.¹; A. Guzmán¹; P. Alvarez¹ y M. Brassiolo¹

Recibido en julio de 2020; aceptado en diciembre de 2020

RESUMEN

La reforestación con *Prosopis alba* Griseb posee un alto potencial para mejorar las condiciones socioeconómicas en sistemas productivos de zonas áridas y semiáridas. En Santiago del Estero la reforestación es una actividad aún no consolidada y muchas de las plantaciones carecen de manejo silvícola; recientemente se lograron avances en la calidad del material de plantación y de prácticas silviculturales iniciales, sin embargo, una de las prácticas que comúnmente no se realizan son los raleos, por su alto costo. El presente trabajo se propuso obtener un modelo preliminar para estimar el volumen de fuste en raleos comerciales con la perspectiva de aportar información en la aplicación de esta práctica, fundamental para mejorar la productividad de las plantaciones en la provincia. Se trabajó con 131 individuos del segundo raleo en una plantación de 17 años. Se trabajó en la construcción de una función de volumen de árboles individuales, probando diferentes modelos de funciones lineales y no lineales. El modelo de regresión lineal mixto (modelo lineal con variable combinada) con varianza de errores con función de varianza exponencial fue el de mejor ajuste, recomendándose preliminarmente, para la determinación de volúmenes de fustes individuales en raleos comerciales de reforestaciones con *Prosopis alba* en Santiago del Estero.

Palabras claves: algarrobo blanco, reforestación, silvicultura, modelos de regresión.

ABSTRACT

Reforestation using *Prosopis alba* Griseb has a high potential to improve the socioeconomic conditions of the productive systems in the arid and semi-arid zones. In Santiago del Estero, reforestation is an activity not yet consolidated and many of the plantations lack silvicultural management. Tough progress in the quality of both the planting material and initial silvicultural practices has been made recently, thinning is one of the practices that are not commonly carried out due to its high cost. This work aimed to obtain a preliminary model for estimating the stem volume in commercial thinning to provide information on the application of this practice, essential to improve the productivity of local plantations. Work upon 131 individuals from the second thinning of a 17-year-old plantation was done. Additionally, a volume function of individual trees was constructed, by testing different models of linear and non-linear functions. The mixed linear regression model (linear model with combined variable) with variance of errors with exponential variance function was that that best fit and is preliminarily recommended, for determining the volumes of individual stems in commercial thinning of reforestations with *Prosopis alba* in Santiago del Estero.

Keywords: white carob, reforestation, forestry, regression models.

¹ Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912 (4200) Santiago del Estero. Argentina. E-mail: senilliani@yahoo.com.ar

1. INTRODUCCIÓN

Entre las varias especies del género, *Prosopis alba* es la más importante por tratarse de una especie de uso múltiple entre los cuales se destacan la madera de extraordinarias características físicas y mecánicas (Felker *et al.*, 1983, Verga, 2005, López, 2005) y el fruto que es un recurso importante utilizado tanto para consumo humano (producción de harina) como forraje para consumo animal (Felker, 2009, Ewens y Felker, 2010).

Por estas características constituye un importante recurso forestal para ser utilizado en sistemas sustentables para mejorar las condiciones socioeconómicas en zonas áridas y semiáridas donde la desertificación no sólo lleva al descenso productivo, sino directamente, a la desaparición de los recursos (Verga, 2000).

En este sentido, el Régimen de Promoción de Plantaciones Forestales para el cultivo de bosques productivos es una importante posibilidad y si bien se reconoce que en la provincia de Santiago del Estero la reforestación es una actividad que aún no se ha consolidado y muchas de las reforestaciones realizadas en el pasado carecen de manejo silvícola, en los últimos años se lograron avances muy importantes en cuanto a calidad genética de las semillas, producción de plantas en viveros y algunas prácticas silviculturales, fundamentalmente podas. Sin embargo, aún faltan conocimientos en cuanto al manejo silvicultural de las plantaciones realizadas con esta especie. Una de las prácticas que comúnmente no se realizan son los raleos, ya que constituyen una actividad de alto costo, pero imprescindible para lograr concentrar el potencial de crecimiento del sitio en los árboles selectos para el corte final y por lo tanto tiene un gran impacto en la calidad y valoración del producto final. Los raleos comerciales tienen la particularidad que los productos obtenidos de su aplicación son de dimensiones y calidades suficientes que permiten su industrialización y según Coronel *et al.* (2014) el cálculo de su costo exige disponer previamente de datos técnicos de tiempos y rendimientos operativos de esta labor silvícola.

Por otro lado las fórmulas de volumen existentes fueron realizadas a partir de un reducido número de árboles de bosque nativo (Giménez *et al.*, 2001) o pertenecen a otras provincias de la región con diferentes calidades de sitio (Kees *et al.*, 2012). En este sentido el presente trabajo se propuso obtener un modelo preliminar de volumen para estimar el volumen de fuste extraído en el raleo comercial de una plantación de *Prosopis alba* Griseb del área de riego del río Dulce, Santiago del Estero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se sitúa en la Subregión del Chaco semiárido de la República Argentina, comprendida en el área de riego del río Dulce, en la provincia de Santiago del Estero, latitud Sur 27° 39' y longitud O 64° 14'. El área de plantación se caracteriza por presencia de agua subterránea cercana (2-5 metros de profundidad). El material de estudio lo constituye una plantación de 17 años, de 3 ha de superficie, establecida en un área con calidad de sitio regular, con manejo forestal durante el ciclo de crecimiento, consistentes en intervenciones silvícolas que comprenden 2 podas en los primeros años, un riego anual durante los primeros años, desmalezados ocasionales, un raleo no comercial a los 9 años y el segundo raleo a los 17 años, a partir del cual se registran los datos para este estudio. El material genético empleado corresponde a orígenes locales ya que al momento de la plantación no se contaba con áreas con mejora genética. En lo que respecta al manejo forestal de la plantación, se presentan sus respectivas variables dasométricas en la Tabla 1.

Tabla 1. Prácticas silvícolas realizadas en la plantación con sus respectivas variables de crecimiento promedios.

Edad (años)	Tratamiento	DAP(cm)	AB(m ² /ha)
3	Podas	3,9	1,09
4	Podas	5,3	1,8
9	1° raleo	-	-
10	-	17,8	7,8
12	-	19,1	11,5
15	-	22,5	10,8
17	2° raleo		

Las variables de crecimiento evaluadas fueron: el diámetro a la altura de pecho (DAP) en cm, la altura de fuste (HF) en m, volumen de fuste (VF) en m³, y la edad (E) expresada en años.

En cuanto a los factores del sitio, presenta una biotemperatura promedio anual de 20.4 °C y precipitación promedio anual de 624 mm. 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). Esta área corresponde a la zona de distribución natural de la especie, por lo que las condiciones climáticas no representan un factor limitante en el crecimiento.

Sin embargo, se sabe que de los factores del sitio, los parámetros edáficos relacionados a la presencia de salinidad tendrán incidencia en el crecimiento de la especie (Senilliani *et al.*, 2019), en base al estudio de calidad de sitio desarrollado por los mencionados autores se considera que el área representa a rodales de calidades de sitio regular en lo que respecta al crecimiento en altura dominante. Las características presentes en esta plantación, comunes a otras tantas dentro del área de riego permitirán proyectar los resultados hacia otros casos, a modo de orientar la toma de decisiones en tratamientos intermedios.

La prescripción del primer raleo consistió en la extracción de individuos de fuste deformado o crecimiento deficiente. Para el segundo raleo se utilizó el método de “raleo por lo alto” para lo cual se seleccionaron individuos con mejores características de altura de fuste y diámetro y se marcaron para su extracción aquellos que producían la mayor competencia a los árboles selectos. La marcación de pies a extraer se realizó sobre una superficie de 2 ha y correspondió a 131 individuos que representan un 23 % de un total de 574 pies presentes. El área basal extraída fue de 3 m²/ha que correspondió a la extracción de aproximadamente 25 % al 30 % del área basal total.

Para la evaluación de campo, previo al apeo de los árboles, se realizó la medición del diámetro (DAP) y la altura de fuste (HF) de los árboles a ralear. Posteriormente, se apearon los árboles que anteriormente fueron seleccionados, se realizó la cubicación utilizando el método destructivo de toma de muestras y se midieron cada una de las trozas correspondientes a la altura de fuste.

Para la determinación directa del volumen se aplicó el método analítico, mediante la fórmula de Newton que requiere definir las secciones en base a tres mediciones sucesivas, las cuales deben realizarse a intervalos uniformes. Se registraron 3 mediciones de diámetros por troza y la longitud de la troza correspondiente.

$$\text{Volumen de Newton} = \left[\frac{S_b + 4S_m + S_s}{6} \right] L$$

El volumen de la troza expresado en m³, S_b es la sección basal (mayor) de la troza (cm), S_s es la sección en el extremo menor de la troza (cm), S_m es la sección en la mitad de la troza y L es la longitud de la troza (m). El volumen total o de una fracción del fuste del árbol se obtuvo sumando los volúmenes obtenidos de las secciones. Se presentan los estadísticos descriptivos de las variables DAP, volumen y altura de fuste de los pies extraídos en el raleo comercial (Tabla 2).

Tabla 2. Variables analizadas y los estadísticos descriptivos correspondientes a los pies extraídos en el raleo comercial a los 17 años en plantación de *Prosopis alba*

	Promedio	Desviación estándar	Valores mínimos	Valores máximos	Coefficiente de variación (%)
DAP(m)	0,24	0,04	0,15	0,39	17,9
Volumen (m ³)	0,08	0,03	0,02	0,19	43,1
Altura de fuste (m)	2	0,6	0,7	4	32,7

Se trabajó en la construcción de una función de volumen de árboles individuales a partir de los 131 individuos extraídos en el raleo, probando diferentes modelos de funciones lineales y no lineales para determinar la más precisa según los criterios definidos (Tabla 3). La selección del mejor modelo se realizó en base a varios criterios. Entre ellos, el criterio de información de Akaike (AIC) y criterio bayesiano de información de Schwartz (BIC), el comportamiento de los residuos, el error estándar de estimación (EEE) y la simplicidad en cuanto a la cantidad de variables del modelo.

Tabla 3. Modelos lineales y no lineales utilizados en el cálculo del volumen comercial de *Prosopis alba*.

Modelo	Nombre	Función
M1	Potencial linealizado con variable combinada	$Ln V = \alpha + \beta x Ln(Dap x HF)$
M2	Potenciallinealizado	$Ln V = \alpha + \beta x Ln Dap + \gamma x Ln HF$
M3	desconocido	$Ln V = \alpha + \beta x Ln Dap$
M4	Dissescu-Meyer	$V = \alpha x Dap + \beta x Dap^2$
M5	Lineal con variable combinada	$V = \alpha + \beta x ((Dap^2) x HF / 100)$
M6	Weibull	$V = 1 - \exp(-(Dap / \alpha)^\beta)$

V = Volumen (m³); DAP= Diámetro a la altura de pecho (cm); HF = Altura de fuste (m); α , β , γ , = Parámetros a estimar.

La validación del modelo seleccionado se realizó utilizando el método *Leave one out* o *Jakknife*. Se utilizó como medida del error y de sesgo, el cuadrado medio del error promedio (ECMP) y el coeficiente de variación que refleja la variabilidad de la estimación del modelo.

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

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de los 6 modelos descritos en la Tabla 3 determinó el ajuste de las siguientes ecuaciones (Tabla 4).

Tabla 4. Criterios de bondad de ajuste para modelos lineales y no lineales de efectos fijos con y sin transformación de las variables.

N°	Modelos	Modelos de regresión lineal		
		AIC	BIC	EEE
1	$\ln V = \alpha + \beta \times \ln(Dap \times HF)$	95,8	104,5	0,33
2	$\ln V = \alpha + \beta \times \ln Dap + \gamma \times \ln HF$	72,2	83,7	0,3
3	$\ln V = \alpha + \beta \times \ln Dap$	144,88	153,5	0,4
4	$V = \alpha \times Dap + \beta \times Dap^2$	-496,5	-487,8	0,04
5	$V = \alpha + \beta \times ((Dap^2) \times HF / 100)$	-614,71	-606,25	0,02
Modelos clásicos de regresión no lineal				
6	Weibull $V = 1 - \exp(-(Dap / \alpha)^\beta)$	-496	-487,3	0,04

La comparación entre los criterios de ajuste se realiza considerando dos grupos, uno de ellos donde la variable dependiente es el “volumen” y en el otro, donde la variable dependiente es el “LnVol”, ya que no se pueden comparar las varianzas entre variables diferentes. De acuerdo a esto, se observa que el modelo 2 presenta los mejores valores para los criterios de ajuste. Con respecto a los demás modelos donde la variable dependiente es el “volumen”, el modelo 5 presenta el mejor ajuste (Tabla 4). En ambos casos, las ecuaciones de volumen que incluyen más de una variable dependiente presentan mejores ajustes, así lo reflejan los modelos que incluyen el DAP y la HF, esto coincide con las apreciaciones de Silva García *et al.* (2018) en el ajuste de modelos para *Prosopis articulata* S. Watson.

Sin embargo, en el análisis de los residuos se pudo detectar un efecto de heterocedasticidad en el modelo 5, que suele ser común en poblaciones de árboles según diferentes autores (Barrena *et al.*, 1986; Torres y Magaña, 2001; Silva García *et al.*, 2018) dado que a mayores valores de diámetro y altura, la variación en los volúmenes de los árboles se hace más grande. Se realizó un nuevo ajuste con el modelo 5 donde se modeló la varianza mediante la función “*varexp*”, que mejoró significativamente la distribución de los residuos y los valores de los criterios de bondad de ajuste.

Tabla 5. Criterio de bondad de ajuste para el modelo lineal mixto.

Modelo	Estructura de correlación y varianza de error	Modelo Mixto de regresión lineal		
		AIC	BIC	EEE
$V = \alpha + \beta \times ((Dap^2) \times HF / 100)$ $R^2=0,73$	Función de varianza exponencial	-619,16	-608,14	0,01

El modelo con mejor ajuste es el modelo de regresión lineal mixto (lineal con variable combinada) con varianza de los errores con función de varianza exponencial, siendo el coeficiente de regresión alcanzado de 0,73 (Tabla 5). Los parámetros estimados en la función fueron altamente significativos ($p < 0,0001$), se presentan los coeficientes estimados y la desviación estándar en cada caso (Tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes estimados para la función con mejor ajuste

Modelo ajustado	α	β
Lineal con variable combinada (función de varianza exponencial)	$0,01 \pm 0,0004$	$56,1 \pm 3,7$

Kees *et al.* (2012) utilizando el mismo modelo para plantaciones con *Prosopis alba* en la provincia de Chaco, obtuvo valores de R^2 de 95,1 %, con valores en el error estándar de estimación de 0,0129, valor de error que coincide con este estudio. Se debe considerar que en este trabajo se utilizaron los árboles seleccionados para ser raleados por lo tanto la muestra analizada puede no ser representativa de toda la curva de distribución de diámetros. Otro aspecto a resaltar es la variabilidad existente en las plantaciones, en la Figura 1 se observa que el volumen presenta baja correlación con la variable DAP, al igual que con la HF, generándose una amplia nube de puntos que reflejan la variabilidad en cada situación.

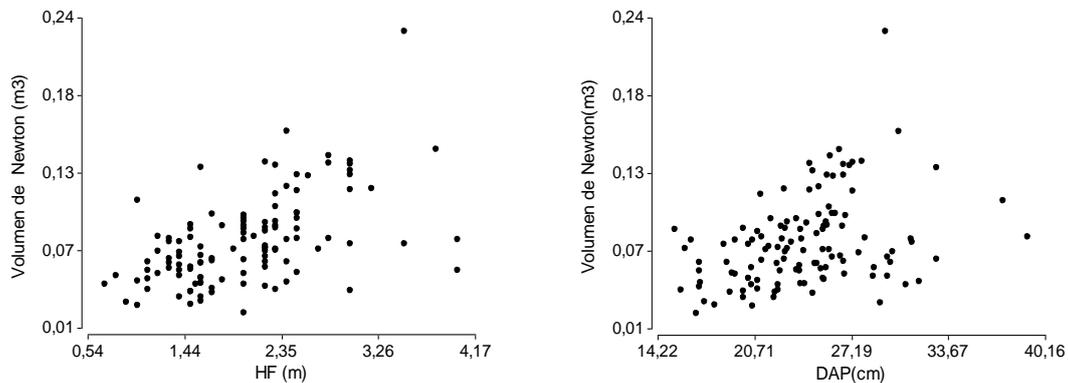


Figura 1. Gráfica de dispersión de pares de datos de volumen cubicados mediante fórmula de Newton en relación a las variables HF y DAP

Las alturas de fuste registradas en los individuos del rodal se dan en un rango amplio de 0,7 a 4 metros, al igual que los DAP varían desde 15 cm a 40 cm.

Sin embargo el ajuste del volumen de fuste cuando se asocia a ambas variables (DAP y HF) mejora notablemente, según se observa en la Figura 2, la correlación del volumen es mayor con el término $(DAP^2 \times HF/100)$.

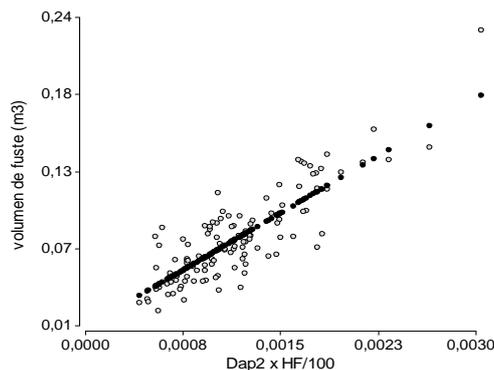


Figura 2. Gráfica de dispersión de datos de volumen de fuste en relación a la variable combinada $DAP^2 \times HF/100$.

La evaluación de la precisión en la validación realizada indica para el modelo ajustado un valor de $8,9 \times 10^{-4}$ para el error cuadrático medio de predicción, con un coeficiente de variación de 37 %. Se considera un error relativamente alto, en comparación a otras experiencias, como es el caso de estudios realizados en Lengua, Chauchard *et al.* (2009) ajustaron un modelo regional para el volumen con un error estándar de estimación que representó un 18 % del volumen medio de

las estimaciones de la muestra, o en bosques de Roble, Laurel y Lingue, Salas (2002) ajustó ecuaciones con menor ECMP de 15 % a 24 %.

En coincidencia con este autor, se observa que el aumento del error (Figura 3) se podría deber a que por el método de raleo utilizado fueron extraídos algunos árboles que si bien competían con otros de mejor forma y/o mayor diámetro, poseían un fuste marcadamente mayor que la media de los individuos extraído en el raleo, produciendo fuertes desviaciones con relación a la media en el caso del volumen.

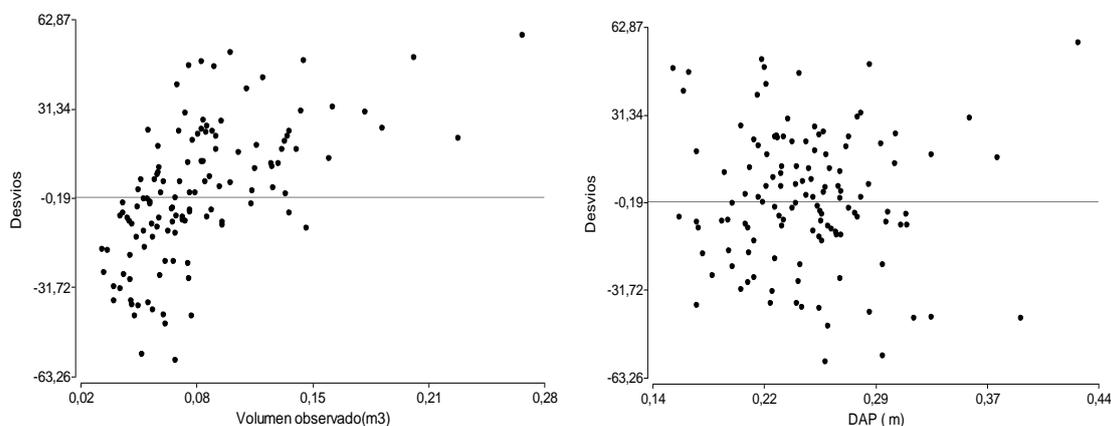


Figura 3. Gráfica de los desvíos expresados en porcentaje en relación al volumen observado en m^3 (izquierda) y al Diámetro en m (derecha).

Rendimientos del raleo

Las características individuales de los pies extraídos describen una alta variabilidad principalmente en el volumen, que puede correlacionarse a la variación en altura de fuste de los pies (Tabla 2). El volumen de extracción bajo los criterios definidos en el raleo comercial correspondió a un total de $10,68 m^3$. El destino de la madera en su mayor parte fue para carpintería destinada a la producción de muebles de pequeñas dimensiones y aberturas, destinando el resto a la producción de leña.

4. CONCLUSIONES

El modelo de regresión lineal mixto (modelo lineal con variable combinada) con varianza de los errores con función de varianza exponencial, fue el que obtuvo el mejor ajuste con un coeficiente de regresión alcanzado de 0,73. La evaluación de la precisión indica para el modelo un valor relativamente alto para el error cuadrático medio de predicción, con un coeficiente de variación de 37 %. Sin embargo, ante la falta de información y de un número importante de plantaciones para ampliar la base de datos y optimizar el ajuste de una ecuación de volumen con mayor precisión, se sugiere restringir el uso de esta ecuación sólo a plantaciones de características similares. Se reconoce el valor preliminar de este trabajo debido al escaso número de plantaciones que llegaron a la oportunidad del segundo raleo en el área de estudio, por ello el grupo de trabajo pretende ampliar la base de datos para lograr una ecuación de mayor precisión representativa para rodales raleados en Santiago del Estero

La realidad local indica que sólo un reducido número de rodales en condiciones de ser raleados han recibido esta práctica, por esta razón se considera de importancia proporcionar datos preliminares para el cálculo del volumen comercial a campo, a los efectos de evaluar la rentabilidad del tratamiento, razón principal para su postergación o directamente para no

realizarlo. Se considera oportuno a futuro, fortalecer la base de datos incorporando información que actualmente se encuentra en investigación sobre nuevas prácticas de raleo, en diferentes situaciones de manejo, según calidades de sitio, densidades y edades.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrena, V.; J. Dancé y D. Sáenz, 1986. Metodología para la Selección de Ecuaciones de Volumen. *Revista Forestal del Perú* 13(2): 3-12.
- Chauchard, L.; R. Sbrancia; A. Medina; A. Rabino, 2009. Funciones de volumen para *Prosopis caldenia* (Buk), Argentina. *Quebracho* 17 (1,2): 41-51.
- Coronel de Renolfi, M.; G. Cardona; J. G. Moglia, A. T. Gómez. 2014. Productividad y costos del raleo de algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Santiago del Estero, Argentina. Una primera aproximación. *Agrociencia* 18 (2):128-136. Uruguay.
- Di Rienzo, J.; F. Casanoves; M. Balzarini; L. González; M. Tablada; C. Robledo. 2018. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Ewens, M. and P. Felker. 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. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.030>.
- Felker, P.; G. H. Cannell; P. Clark; J. F. Osborn; P. Nash. 1983. Producción de biomasa de especies de *Prosopis* (mezquite), *Leucaena* y otros árboles leguminosos cultivados bajo estrés por calor sequía. *Forest Science*, 29(3): 92-606, Disponible en: <https://doi.org/10.1093/forestscience/29.3.592>.
- Felker, P. 2009. Unusual physiological properties of the arid adapted tree legumes *Prosopis* and their applications in developing countries. In: De la Barrera, E., Smith, WK (Eds.), *Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology: A Tribute to Park S. Nobel*. p 221-255, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Giménez, A. M.; N. Ríos; J. G. Moglia; P. Hernández y S. Bravo. 2001. Estudio de magnitudes Dendrométricas en función de la edad en *Prosopis alba* Griseb, algarrobo blanco, Mimosaceae. *Forest. Venez.* 45 (2): 175-183.
- Godagnone, R. y J. De La Fuente, 2001. *Regionalización Ecológica del NOA*. Instituto de Suelos CIRN-INTA.
- Kees, S. M.; C. A. Gómez; A. R. Verga; F. Muttoni, 2012. *Funciones de volumen de fuste para árboles individuales de forestaciones con Prosopis alba Griseb en la provincia del Chaco*; II Reunión nacional de algarrobo. Córdoba.
- López, C. 2005. Evaluación de la Variación Genética de Especies del Género *Prosopis* de la Región Chaqueña Argentina para su Conservación y Mejoramiento. En: *Mejores Árboles para más Forestadores*. Editor: Carlos Norberto, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca. p 195-203. Buenos Aires. ISBN: 9879184475.
- Salas, C. 2002. Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque* 23(2): 81-92.
- Senilliani, M. G.; C. Bruno y M. Brassiolo. 2019. Site index for *Prosopis alba* plantations in the semi-arid Chaco through mixed models. *Cerne* 25(2): 195-202. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201925022622>.
- Silva-García, J.; O. Aguirre-Calderón; E. Alanís-Rodríguez y M. González-Tagle. 2018. Ecuaciones de volumen para *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9 (50). Disponible en: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.261>.

- Torres-Rojo, J. y O. Magaña-Torres. 2001. *Evaluación de Plantaciones Forestales*. México, D.F., México: Ed. Limusa.
- Verga, A. 2000. Algarrobos como especies para forestación: una estrategia de mejoramiento *SAGPyA Forestal* 16: 12-19.
- Verga, A. 2005. Recursos genéticos, mejoramiento y conservación de especies del género *Prosopis*. *En: Mejores árboles para más forestadores*. Editor: Carlos Norberto, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires. p. 205-222. ISBN: 9879184475.

