

TRABAJO CIENTÍFICO

Predicción del diámetro normal y volumen de fuste de *Neltuma alba* en plantaciones de Santiago del Estero, Argentina

Prediction of normal diameter and stem volume of Neltuma alba in plantations of Santiago del Estero, Argentina

V. R. Pérez¹; M. R. Castro²; C. D. Rodríguez³; L. Arce⁴ y J. Mitre⁵

¹ Ing. Ftal. Prof. Tit. Silvicultura de Bosques Implantados. Facultad de Recursos Naturales, Universidad Nacional de Formosa (UNaF). E-mail: victorforestal8@gmail.com

² Ing. Ftal. Facultad de Recursos Naturales, UNaF. E-mail: castro93marcelo@gmail.com

³ Ing. Ftal. Extensionista forestal de Formosa, Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (DNDFI). E-mail: carladanielarodriguez9@gmail.com

⁴ Extensionista forestal de Santiago del Estero, DNDFI. E-mail: induleandro@gmail.com

⁵ Extensionista forestal de Santiago del Estero, DNDFI. E-mail: josemitresgo@gmail.com.

Recibido en febrero de 2023; Aceptado en septiembre de 2023

RESUMEN

Utilizando datos dasométricos de 9 plantaciones localizadas en área bajo influencia del sistema de riego y 2 en área de secano, distribuidas en la amplia zona de clima semiárido cálido de la provincia de Santiago del Estero, donde se concentra la mayor cantidad de forestaciones de *Neltuma alba*, el estudio se ejecutó con el objetivo de determinar el modelo matemático que permita la mejor estimación del diámetro normal y del volumen de fuste de árboles individuales en función del diámetro basal. Los modelos utilizados fueron lineales o linealizables en sus parámetros. De los 248 árboles medidos sin apearlos, el 75 % de la muestra se destinó al proceso de selección del mejor modelo y el 25 % restante al proceso de validación. El coeficiente de determinación ajustado, error estándar de estimación, estadístico de Durbin-Watson, análisis de residuales, error cuadrático medio, diferencia agregada global y diferencia media fueron utilizados en la evaluación de 9 modelos. En base al diámetro basal (x), la función logarítmica [$\ln y = b_0 + b_1 * \ln x$] explicó satisfactoriamente la variación del diámetro normal y el volumen del fuste (y), en tanto la función potencial [$y = b_0 * x^{b1}$] solo resultó idónea en la modelación del diámetro normal. Las ecuaciones resultantes presentaron estadísticos con buenos ajustes, pudiendo utilizarse confiablemente en la zona y especie estudiada.

Palabras clave: regresión, ajuste, modelación.

ABSTRACT

Out of the dasometric data obtained from 9 plantations located in the irrigated area and two in the dry cultivation area distributed throughout the wide zone of the warm semi-arid climate of the province Santiago del Estero, where the largest amount of *Neltuma alba* forestations concentrates, the study was aimed at determining the mathematical model that better allows for the estimation of the normal diameter and stem volume of individual trees based on their basal diameter. The models utilized were linear or linearizable in their parameters. From the 248 standing trees measured, 75% of the sample went into the best model selecting process while the remaining 25% to the validation process. The adjusted coefficient of determination, standard error of estimation, Durbin-Watson statistic, analysis of residuals, mean square error, global aggregate difference, and mean difference were all considered for evaluating those 9 models. Based on the basal diameter (x) of the individuals, the logarithmic function [$\ln y = b_0 + b_1 * \ln x$] satisfactorily explained the variation of normal diameter and the stem volume (y), while the potential function [$y = b_0 * x^{b1}$] was only suitable for modeling the normal diameter. The resulting equations showed statistics with good adjustments and can be reliably applied in the area and species studied.

Keywords: regression, adjustment, modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los árboles emblemáticos del Parque Chaqueño, se destaca el “algarrobo blanco” *Neltuma alba* Griseb. (ex *Prosopis alba*) Hughes & Lewis por los múltiples beneficios que aporta al hombre, siendo utilizada en planes de forestación con la finalidad de obtener madera y frutos. Las singulares características biológicas y silviculturales de la especie le proporcionan un gran potencial para mejorar las condiciones socioeconómicas en sistemas productivos de zonas semiáridas y áridas (Cisneros y Moglia, 2017). Para plantaciones de *N. alba* de la provincia de Santiago del Estero, Senilliani (2021) identificó tres calidades de sitio (bueno, regular y malo), aseverando que la densidad y clase de sitio influyen en los rendimientos volumétricos de fuste de árboles individuales. Para consolidar la creciente expansión de los planes de forestación con esta especie, a nivel regional y provincial, es necesario disponer respuestas a diversas cuestiones dendrométricas, epidométricas y silviculturales aún no resueltas. En este contexto a través del presente estudio se busca dar respuesta al interrogante ¿Cuál es la función que mejor predice el diámetro normal y el volumen de fuste a partir del diámetro basal de árboles individuales de plantaciones de *N. alba* en Santiago del Estero?

La cubicación de árboles en pie o de ejemplares apeados provee información básica para estimar el volumen de madera en los inventarios forestales de plantaciones mediante la utilización de funciones volumétricas (Prodan *et al.*, 1997). Las funciones de volumen, importantes para la gestión de plantaciones forestales, son ecuaciones matemáticas que, siendo ajustadas a una muestra de la población de interés, pueden ser posteriormente utilizadas en la estimación de volúmenes comerciales de las plantaciones, de forma rápida y confiable mediante técnicas de regresión. Las funciones de volumen estiman las existencias de madera en función de variables de fácil medición, como el diámetro, la altura y la forma, para ser empleados en planes de manejo o de aprovechamiento (da Cunha y Guimarães, 2012).

Las funciones de volumen se pueden desarrollar y aplicar a nivel de rodal (principalmente cuando la plantación es homogénea) y a nivel de árbol individual (cuando la plantación es menos homogénea o cuando se realiza por algún otro motivo). El fundamento de estas funciones se basa en utilizar datos obtenidos directamente de los árboles, y que permitan realizar estimaciones precisas de diámetros y volúmenes (Alder, 1980). Para la construcción de funciones de volumen se asume: 1) que el volumen del árbol depende del diámetro, la altura y de la forma fustal; y 2) que una función que determine correctamente el volumen de un árbol también es válida para otros árboles de igual diámetro, altura y forma (Cancino, 2006).

Cuando la forestación ha sido aprovechada o afectada por un disturbio (vientos, incendios, etc.) y solo se tiene como evidencia las dimensiones de los tocones, la estimación de diámetros y volúmenes se vuelve un desafío práctico. En tales casos, a partir de relaciones alométricas es posible estimar el diámetro normal y el volumen de los árboles en función del diámetro del tocón o la base (Bava y López Bernal, 2006). Conocer esta relación es necesario para: 1) cuantificar el volumen extraído por cortas furtivas con el uso de tablas de volumen locales; 2) cuando la información no se obtuvo antes del aprovechamiento o se perdió, lo cual permite conocer la distribución de los diámetros y área basal de árboles y rodales.

En la bibliografía forestal, aunque no sean frecuentes, existen antecedentes sobre la predicción del volumen del árbol en función del diámetro del tocón o la base (Bylin, 1982a; Diéguez *et al.*, 2003; Quiñónez *et al.*, 2012; García-Cuevas *et al.*, 2017). De acuerdo a Maggio y Cellini (2016) en la Argentina existen algunas referencias para diversas especies del género *Prosopis* de aplicación de modelos matemáticos para estimar el diámetro normal y volumen de árboles individuales en función del diámetro basal, aunque en ningún caso se realizó la validación de las ecuaciones. Entre estas funciones se encuentran la reportada por Perpiñal *et al.* (1995) para *Prosopis flexuosa*,

la referida por Conti *et al.* (2008) para *Prosopis nigra* y las informadas por Kees y Gómez (2013) para plantaciones de *Prosopis alba* de la provincia del Chaco.

El objetivo del presente estudio fue determinar el modelo matemático que permita la mejor estimación del diámetro normal y del volumen de fuste de árboles individuales en función del diámetro basal para plantaciones de *N. alba* de la provincia de Santiago del Estero.

2. MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio. Representada por el área ocupada por las plantaciones seleccionadas de *N. alba* de la provincia de Santiago del Estero, que se distribuyen en un amplio gradiente latitudinal (-26,451 y -28,511 S) y longitudinal (-62,998 y -64,470 O) (Figura 1). La provincia tiene un clima subtropical continental, cálido con estación seca y sólo en las zonas de sus serranías es un poco más templado. La temperatura media anual es de alrededor de 21,8 °C. Registra altas temperaturas en verano, invierno con ocasionales heladas y es característico la marcada amplitud térmica diaria. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 700 mm y 900 mm en el Este (límitrofe con Chaco y Santa Fe), disminuyendo progresivamente hacia el Oeste, pudiendo alcanzar los 350 mm (límitrofe con Catamarca). Hay concentración de lluvias en primavera-verano, siendo el balance hídrico deficitario en la mayoría de los meses del año (Frediani, 1992; Boleta, 2001).

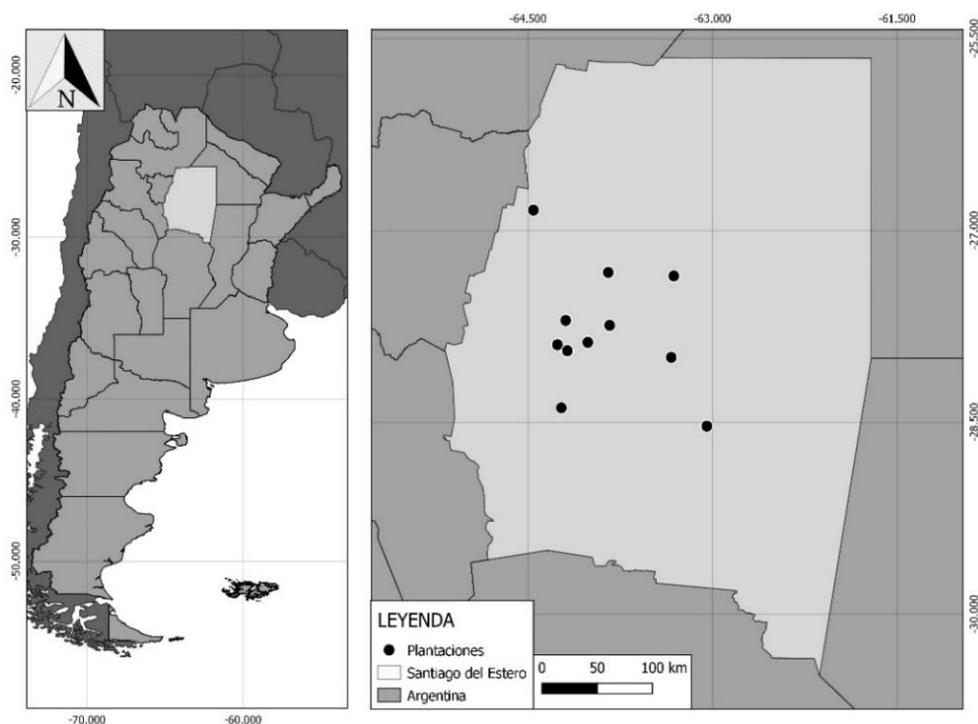


Figura 1. Cobertura espacial del estudio, con georreferenciación de las once plantaciones evaluadas. Provincia de Santiago del Estero, Argentina.

Obtención y digitalización de los datos. Los datos proceden de 11 plantaciones con ≤ 20 hectáreas cada una, 500 (una plantación) a 625 pl.ha⁻¹ de densidad inicial, 9 plantaciones con

edades inferiores a 16 años y 2 con 18 y 23 años respectivamente, manejadas con prácticas convencionales de podas (longitud de poda variable, entre 1,5 m y 3,0 m) y raleo selectivo solo en algunas plantaciones. Ubicación por Departamento: 3 en Capital y Banda, 2 en Robles y 1 en Alberdi, Avellaneda y Jiménez; 9 plantaciones se localizan en área bajo influencia del sistema de riego y 2 en área de secano. Las plantaciones están distribuidas en una amplia zona de clima semiárido cálido, donde se concentra la mayor cantidad de forestaciones de Algarrobo blanco. En el contexto de los suelos (Orden, textura) las plantaciones relevadas se desarrollan básicamente sobre suelos Aridisol, Molisol y Alfisol (Fuente: Atlas de Suelos de la República Argentina. INTA, 1990).

En cada forestación se estableció de manera aleatoria una parcela rectangular de 800 m², de la cual se relevaron entre 21 y 23 árboles, de 4 a 6 plantas por clase diamétrica, cubriendo todo el rango de tamaño diamétrico. En total se midieron 248 árboles, con rango de diámetro basal entre 12 cm y 44 cm. Mediante técnica de medición no destructiva, es decir sin apeaar los árboles (Rodríguez y Fernández, 2009), midiéndose en cada individuo el diámetro de la base (DB, medido a 5 cm del suelo), el diámetro normal medido a 1,30 m (DN), el diámetro a los 2 m (desde el suelo), el diámetro en punta fina (parte superior del fuste, medido 15 cm por debajo de la bifurcación donde se inicia la copa) y la altura de fuste (medidas desde el suelo hasta la primera bifurcación) (Pérez *et al.*, 2020). Se utilizó cinta diamétrica, telescopio y escalera metálica plegable, abarcando todo el rango de distribución del diámetro y de altura de fuste de cada plantación. Para calcular los volúmenes de las diversas secciones del fuste se utilizó la fórmula de Smalian (Prodan *et al.*, 1997); a partir de la sumatoria de estos volúmenes parciales se estimó el volumen del fuste (VF) con corteza para cada árbol.

A través de planilla electrónica de cálculos se efectuó la digitalización y procesamiento de datos. Las submuestras destinadas a las fases de selección de modelos y validación de las funciones matemáticas fueron obtenidas de forma aleatoria, con representación de todas las clases diamétricas de cada plantación. En este contexto se siguió el procedimiento utilizado por Piñones Cáceres (2002) en estudio similar en Chile con población de *Prosopis alba*, escogiéndose el 75 % de los individuos como submuestra para determinar las mejores funciones matemáticas de diámetro normal y volumen según los distintos modelos probados en el presente estudio (fase de selección), y el 25 % restante se utilizó durante el proceso de validación de las mejores funciones (fase de validación). De esta forma en la fase de selección de los modelos se trabajó con 186 árboles y en la fase de validación con 62.

Análisis de datos. Fueron analizados diversos modelos matemáticos (Tabla 1). Mayoritariamente los modelos utilizados fueron lineales o linealizables en sus parámetros, por lo que su ajuste se realizó con el método de mínimos cuadrados. Éstos fueron examinados y analizados a través de la técnica de regresión lineal, con la excepción de la función potencial (M8) donde se utilizó el método de Levenberg-Marquardt para el ajuste de relaciones no lineales (Galíndez *et al.*, 2005). En todos los modelos el diámetro normal y el volumen de fuste fueron las variables respuestas y el diámetro basal (se hace referencia al diámetro de la base y no al diámetro del tocón porque las mediciones se hicieron en árboles en pie) y sus transformaciones fueron las variables predictoras o regresoras.

Tabla 1. Modelos predictivos del diámetro normal (DN) y volumen de fuste (VF) en función del diámetro basal (DB) utilizados en plantaciones de *N. alba* de Santiago del Estero.

Código Modelo	Expresión Matemática del Modelo	Referencia
M1	$DN = b_0 + b_1 (DB) + \epsilon$	Bylin, 1982b; Diéguez Aranda <i>et al.</i> , 2003; Pompa García <i>et al.</i> , 2011; Quiñónez Barraza <i>et al.</i> , 2012;
M2	$DN = b_0 + b_1 (DB)^2 + \epsilon$	Kees y Gómez, 2013;
M3	$\ln DN = b_0 + b_1 (\ln DB) + \epsilon$	García Cuevas <i>et al.</i> , 2016, 2017
M4	$DN = b_0 + b_1 (DB) + b_2 (DB)^2 + \epsilon$	Kees y Gómez, 2013
M5	$DN = b_0 + b_1 (1/DB) + \epsilon$	Perpiñal <i>et al.</i> , 1995 (*)
M6	$DN = b_0 + b_1 (\ln DB) + \epsilon$	Castro <i>et al.</i> , 2017 (adaptado)
M7	$\ln DN = b_0 + b_1 * DB + b_2 * DB^2 + \epsilon$	García Cuevas <i>et al.</i> , 2017
M8	$DN = b_0 * (DB)^{b_1} + \epsilon$	Castro <i>et al.</i> , 2017 (adaptado)
M9	$\ln DN = b_0 + b_1 * \ln DB + b_2 * \ln DB^2 + \epsilon$	
M1	$VF = b_0 + b_1 * DB + \epsilon$	Diéguez Aranda <i>et al.</i> , 2003; Quiñónez Barraza <i>et al.</i> , 2012;
M2	$VF = b_0 + b_1 * DB^2 + \epsilon$	Kees y Gómez, 2013;
M3	$\ln VF = b_0 + b_1 * \ln DB + \epsilon$	García Cuevas <i>et al.</i> , 2016, 2017
M4	$VF = b_0 + b_1 * DB + b_2 * DB^2 + \epsilon$	Kees y Gómez, 2013
M5	$VF = b_0 + b_1 * (1/DB) + \epsilon$	Perpiñal <i>et al.</i> , 1995
M6	$VF = b_0 + b_1 * \ln DB + \epsilon$	Castro <i>et al.</i> , 2017
M7	$\ln VF = b_0 + b_1 * DB + b_2 * DB^2 + \epsilon$	García Cuevas <i>et al.</i> , 2017
M8	$VF = b_0 * (DB)^{b_1} + \epsilon$	Castro <i>et al.</i> , 2017
M9	$\ln VF = b_0 + b_1 * \ln DB + b_2 * \ln DB^2 + \epsilon$	

(*) Para este estudio se adaptó el modelo planteado por Perpiñal *et al.* (1995,) reemplazándose la variable respuesta VF por DN.

Fase de selección de los modelos. A fin de identificar la presencia de valores atípicos o “outliers” en los datos se analizó el gráfico de residuos frente al valor predicho de la variable respuesta (referido por Diéguez *et al.*, 2003). La selección de los mejores modelos se realizó en función de:

1. Los criterios y procedimientos planteados por Couto y Vettorazzo (1999).

1.1 Evaluación del cuadro de análisis de varianza y la prueba F para el modelo completo. Análisis de varianza correspondiente al modelo de regresión lineal ($\alpha = 0,05$).

1.2 Evaluación de las ecuaciones con mejor estimación a través de los estadísticos coeficiente de determinación ajustado (R^2 Aj.), error estándar de estimación absoluto y relativo (S_{yx} y $S_{yx}\%$) y el estadístico de Durbin-Watson (D-W). Se utilizó el Índice de Furnival (IF) para comparar ecuaciones con diferente número de parámetros o en el caso que una de ellas tuviera a la variable respuesta como expresión de logaritmo respecto de otra variable respuesta sin logaritmo. Para estimar el diámetro normal y volumen de fuste a partir de modelos logarítmicos se aplicó el factor de corrección de discrepancia logarítmica propuesto por Meyer (1944).

1.3 Análisis y evaluación de la distribución gráfica de los residuos. El examen visual del gráfico de los valores reales de las variables frente a los predichos superpuestos sobre la recta ideal 1:1, contribuyó en la identificación del mejor modelo (útil también en la fase de validación).

1.4 Prueba de hipótesis de los coeficientes estimados a través de la prueba de *t*.

2. Los criterios recomendados por Emanuelli y Milla (2014) para la selección del mejor modelo ajustado. Estos son el Error Cuadrático Medio (ECM), Diferencia Agregada Global (DAG) y la Diferencia Media (DM), cuyas expresiones algebraicas se transcriben a continuación:

$$ECM = \frac{(Vr - Ve)^2}{n} \quad DAG = \frac{\sum Vr - \sum Ve}{\sum Ve} \quad DM = \frac{\sum (Vr - Ve)}{n \sum Ve}$$

Donde Vr es el valor real de la variable respuesta y Ve es el valor estimado por el modelo.

Se verificó el cumplimiento de los supuestos básicos de la regresión a cada uno de los mejores modelos seleccionados: 1) Normalidad. A tal fin se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS). 2) Independencia entre los residuos o de la inexistencia de autocorrelación, por medio de la prueba de Durbin - Watson (D-W). 3) Homogeneidad de varianza (homocedasticidad), constatada a través de la interpretación del gráfico de los residuales frente a los valores ajustados por el modelo. El análisis estadístico se realizó con el programa InfoStat Versión 2020p.

Fase de Validación de los Modelos. Con base a la propuesta formulada por Cao *et al.* (1980), en el proceso de validación se utilizaron los estimadores estadísticos de Raíz Cuadrada del Error Medio Cuadrático - REMC (estimador de exactitud) y Diferencia Agregada - DA (estimador de sesgo). A continuación, se representa la expresión algebraica de estos estimadores:

$$REMC = \sqrt{\left[\frac{\sum (Vr - Ve)^2}{n} \right]} \quad DA = \frac{\sum (Vr - Ve)}{n}$$

Donde, Vr es el valor real de la variable respuesta del árbol y Ve es el valor estimado por la función matemática. El valor relativo de estos estimadores se obtiene al dividirlos por el valor real medio (variable respuesta) y multiplicado por 100.

El investigador define los valores máximos permisibles para estos estadísticos según la exigencia que establezca para el estudio y considerando antecedentes. Por ejemplo, Pérez (2004) citado por Emanuelli y Milla (2014) fijó un 10 % para la exactitud y un 5 % para el sesgo como valores máximos, al comparar funciones de volumen (variables diámetro y altura) y ahusamiento para renovales de Roble en Chile. En el presente estudio para la estimación del DN y VF se establecieron como valores máximos el 10 % y 20 % para la exactitud y 2,5 % y 5% para el sesgo, respectivamente. Para la estimación del volumen la menor exactitud y precisión admitida es comprensible dada la mayor variabilidad y dispersión de la variable respuesta para un mismo valor del diámetro basal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diámetro normal

Proceso de preselección. En la Tabla 2 figuran las ecuaciones determinadas para cada modelo. En la Tabla 3 se presentan de forma resumida los estimadores estadísticos utilizados. De la base de datos inicial fueron eliminados dos árboles (los de mayores DN: 39,9 cm y 40,1 cm) ya que sus datos se encuadraban en la categoría de *outliers*. Los modelos 1, 3, 7 y 8 preseleccionados cumplen los supuestos del modelo de regresión y en las pruebas F y t presentaron resultados estadísticamente significativos, exhibiendo los valores más altos de coeficiente de determinación. En tanto, los modelos 2, 5 y 6 no calificaron por incumplimiento del supuesto de homocedasticidad. Los modelos 4 y 9 se descartaron porque en la prueba del estadístico *t*, presentaron uno o los dos coeficientes no significativos ($\alpha = 0,05$).

Tabla 2. Determinación de ecuaciones en el proceso de preselección de estimación del diámetro normal (DN) en función del diámetro basal (DB) para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

Mod	Ecuación
1	$DN = -0,013802 + 0,94434 * DB$
2	$DN = 0,095787 + 1,86703 * DB^2$
3	$Ln DN = -0,006981 + 1,08089 * Ln DB$
4	$DN = -0,016163 + 0,96555 * DB - 0,04399 * DB^2$
5	$DN = 0,384789 - 0,038981 * 1 / DB$
6	$DN = 0,512390 + 0,205105 * Ln DB$
7	$Ln DN = -3,278450 + 9,64590 * DB - 10,1066 * DB^2$
8	$DN = 0,962716 * DB^{1,0599}$
9	$Ln DN = -0,008018 + 53,3743 * Ln DB - 26,1472 * Ln DB^2$

Tabla 3. Análisis de estadísticos en la preselección de modelos de estimación del diámetro normal en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

Mod	F	t		R ² Aj.	S _{yx} IF	S _{yx} % IF%	D-W	N	Regla de decisión
		b ₁	b ₂						
1	5684	S	-	96,9	0,00950	5,05	1,97	184	Preseleccionado
2	3014	S	-	94,3	0,01410	7,49	1,77	184	Descartado
3	5158	S	-	96,6	0,00923	4,90	1,97	184	Preseleccionado
4	2826	S	NS	96,9	0,00953	5,06	1,96	184	Descartado
5	1037	S	-	85,1	0,02039	10,83	1,95	184	Descartado
6	2689	S	-	93,7	0,01339	7,11	1,97	184	Descartado
7	2409	S	S	96,4	0,00960	5,10	2,01	184	Preseleccionado
8	5724	S	-	97,3	0,00975	5,18	1,71	184	Preseleccionado
9	2569	NS	NS	96,6	0,00925	4,91	2,00	184	Descartado

En la Tabla 4 se exponen los resultados analíticos del proceso de selección de modelos.

Tabla 4. Evaluación de parámetros estadísticos en la selección de modelos de estimación del diámetro normal en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

	Mod 1	Mod 3	Mod 7	Mod 8
ECM	0,000074	0,000072	0,000074	0,000071
DAG	-0,00725	-0,00591	-0,00702	-0,00859
DM	-0,00012	-0,00010	-0,00011	-0,00014

En la Figuras 2 se exponen resultados del proceso de selección de modelos, observándose que los errores se distribuyen sin tener un patrón definido, asumiéndose que dichos modelos no presentan problemas de heterocedasticidad; el intervalo de los valores residuales es pequeño.

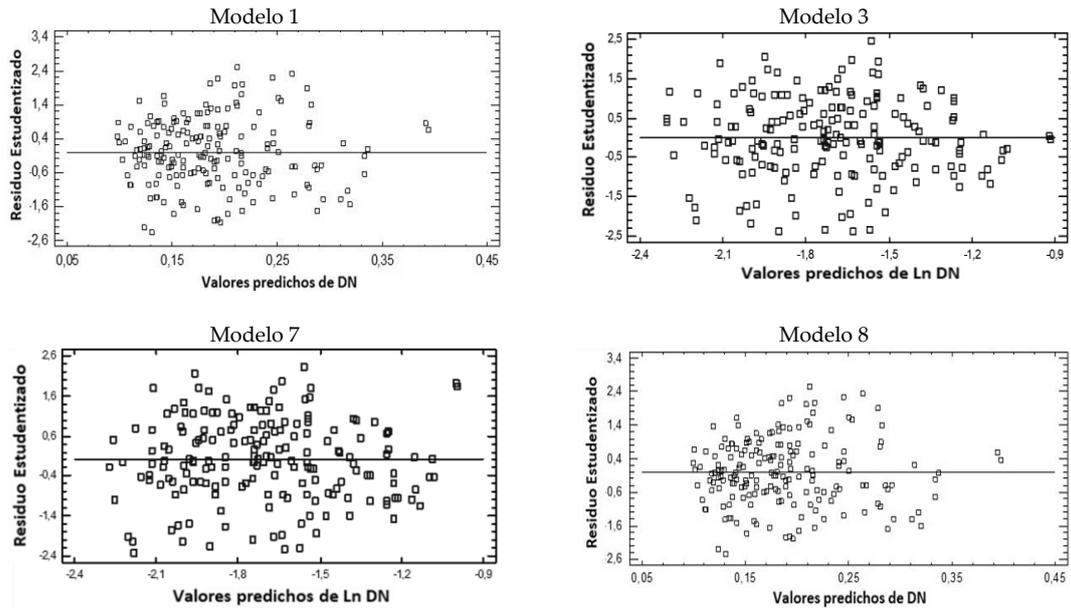


Figura 2. Diagrama de dispersión del DN y Ln DN del modelo ajustado frente a los residuos “estudentizados” correspondientes a los cuatro mejores modelos para plantaciones de *Neltuma alba* en Santiago del Estero.

En la fase de validación (Tabla 5) se constata que los menores valores de los estimadores de exactitud correspondieron a los modelos 3 y 8. Considerando el signo negativo de los valores del sesgo, inferiores a 1 %, existe una sobreestimación de los valores predichos por los modelos.

Tabla 5. Evaluación de parámetros estadísticos en la validación de los mejores modelos de estimación del diámetro normal en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

	Mod 1	Mod 3	Mod 7	Mod 8
REMC	0,00858	0,00848	0,00862	0,00844
REMC %	5,11	5,05	5,14	5,03
DA	-0,00123	-0,00100	-0,00119	-0,00145
DA %	-0,73	-0,59	-0,71	-0,87

En la Figura 3 no se evidencia la existencia de sesgo o de tendencias anómalas de las estimaciones de los modelos 3 y 8.

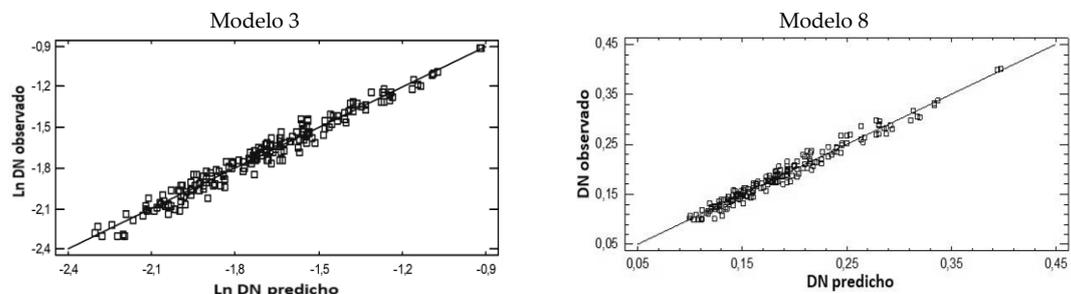


Figura 3. Representación del logaritmo del DN (izq.) y del DN (der.) de los valores observados y predichos correspondientes a los dos mejores modelos para plantaciones de *Neltuma alba* de Santiago del Estero.

Los estadísticos y gráficos de residuales de los cuatro mejores modelos seleccionados cumplen satisfactoriamente los requisitos de un adecuado ajuste. En este contexto el modelo 1 (lineal), referido con frecuencia en los estudios forestales (p.ej. Bylin, 1982a, 1982b; Pompa-García *et al.*, 2011, García-Cuevas *et al.*, 2016, 2017), se destaca por su simpleza y tener un desempeño satisfactorio para predecir los diámetros normales con corteza, aunque no resultó la función con mejor desempeño.

De acuerdo a los paramétricos estadísticos evaluados los mejores desempeños corresponden a los modelos 3 (logarítmico) y 8 (potencial). Considerando que las diferencias entre estos modelos son mínimas y encontradas, donde el REMC expone al modelo 8 con mayor exactitud (diferencia 0,02 % respecto al modelo 3) mientras que el DA muestra al modelo 3 con superior precisión (diferencia 0,28 % respecto al modelo 8), resulta que cualquiera de ellos podría utilizarse para la estimación del diámetro normal en función del diámetro basal.

En la literatura forestal existen múltiples evidencias de la eficiencia y versatilidad del modelo logarítmico para explicar la relación y predecir el diámetro normal a partir del diámetro del tocón o basal (p.ej. Benítez *et al.*, 2004 para plantaciones de *Casuarina equisetifolia* L. en Cuba; Bava y López Bernal, 2006 en árboles de *Nothofagus pumilio* K. en Tierra del Fuego, Argentina; Filio Bonilla, 2010 para plantaciones de *Eucalyptus globulus* L. en Perú; Quiñónez *et al.*, 2012 para masas forestales de *Pinus arizonica*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus durangensis*, *Pinus leiophylla*, *Pinus teocote* y *Quercus sideroxyla* en Durango, México). Kees y Gómez (2013) para árboles de *Prosopis alba* de plantaciones del Chaco (Argentina) reportan que el modelo logarítmico tuvo el mejor desempeño, aunque con un coeficiente de determinación menor (R^2 ajustado = 89,94).

Evaluando el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión, los estimadores de bondad de ajuste, la distribución de residuales, la adecuada capacidad predictiva, alta exactitud y precisión, resulta que el modelo logarítmico representado por la ecuación $DN = EXP (-0,006981 + 1,08089 * Ln DB)$ y el modelo potencial a través de la expresión $DN = 0,962716 * DB^{1,0599}$, resultan válidos para predecir y explicar la variabilidad del diámetro normal (DN expresado en m) en función del diámetro de la base (DB expresado en m), en el rango de 12 a 38 cm de DB. En consecuencia, se puede aseverar razonablemente que dichas ecuaciones son aplicables a la población y no son específicos de la muestra utilizada.

3.2 Volumen de Fuste

Proceso de preselección. A continuación, se exponen los resultados del proceso de preselección de modelos. En la Tabla 6 figuran las ecuaciones determinadas para cada modelo. En la Tabla 7 se presentan de manera resumida los valores establecidos para los diversos estimadores estadísticos utilizados.

Tabla 6. Determinación de ecuaciones en el proceso de preselección de estimación del volumen de fuste (VF) en función del diámetro basal (DB) para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

Mod	Ecuación
1	$VF = -0,091308 + 0,744816 * DB$
2	$VF = -0,0112423 + 1,59936 * DB^2$
3	$Ln VF = 0,560755 + 2,19704 * Ln DB$
4	$VF = 0,0400024 - 0,450979 * DB + 2,5127 * DB^2$
5	$VF = 0,198293 - 0,0257934 * 1 / DB$
6	$VF = 0,302906 + 0,148522 * Ln DB$
7	$Ln VF = -5,84176 + 17,1845 * DB - 15,1148 * DB^2$
8	$VF = 2,55521 * DB^{2,44896}$
9	$Ln VF = 0,569844 - 256,185 * Ln DB + 129,195 * Ln DB^2$

Tabla 7. Análisis de estadísticos en la preselección de modelos de estimación del volumen de fuste en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

Mod	F	t		R ² Aj.	S _{xy} IF	S _{xy} % IF%	D-W	N	Regla de decisión
		b ₁	b ₂						
1	822	S	-	81,8	0,01893	27,54	1,89	184	Descartado
2	1557	S	-	89,5	0,01427	20,77	1,89	184	Descartado
3	2817	S	-	93,9	0,00755	10,99	2,02	184	Preseleccionado
4	899	S	S	90,7	0,01345	19,56	1,89	184	Descartado
5	222	S	-	54,7	0,02911	42,35	1,88	184	Descartado
6	408	S	-	69,0	0,02448	35,62	1,88	184	Descartado
7	1490	S	S	94,2	0,00739	10,75	1,91	184	Preseleccionado
8	5724	S	-	92,8	0,01460	21,24	1,16	184	Descartado
9	1411	NS	NS	93,9	0,00756	11,00	2,02	184	Descartado

Los modelos 1, 2, 4, 5 y 6 se descartaron por tener los valores más bajos de R² y S_{xy} altos; el modelo 8 se rechazó por no cumplir el supuesto de homocedasticidad y el modelo 9 se desechó porque en la prueba del estadístico T los coeficientes no fueron significativos ($\alpha = 0,05$). Los modelos 3 y 7 fueron preseleccionados por cumplir con los requisitos y presentar los mejores valores estadísticos.

En Tabla 8 se exponen los resultados del proceso de selección realizado con las respuestas de los modelos 3 y 7. El modelo 3 se destaca levemente por tener mejores resultados analíticos.

Tabla 8. Evaluación de parámetros estadísticos en la selección de modelos de estimación del volumen de fuste en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

	Mod 3	Mod 7
ECM	0,000066	0,000074
DAG	0,02590	0,02949
DM	0,00042	0,00048

En la Figura 4 la distribución de los errores carece de un patrón determinado. No existen inconvenientes de heterocedasticidad.

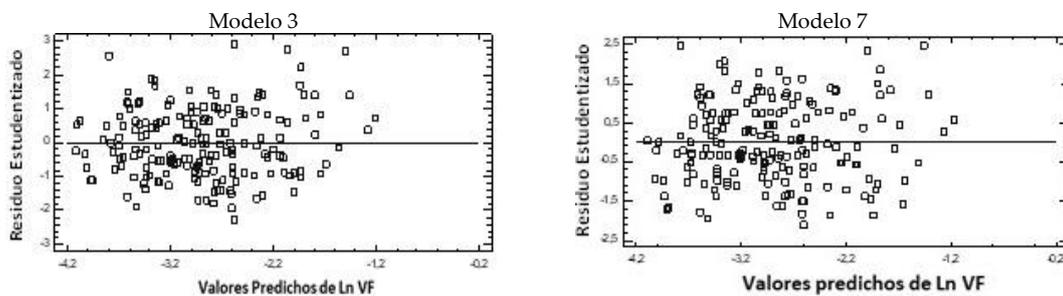


Figura 4. Diagrama de dispersión de Ln VF del modelo ajustado frente a los residuos estudentizados correspondientes a los mejores modelos para plantaciones de *Neltuma alba* de Santiago del Estero.

Los gráficos del análisis de residuales de las estimaciones, Figura 5, son similares y en ninguno se evidencia la existencia de sesgo y de tendencias extrañas. No se hizo un análisis de residuales por clase de altura y/o diámetro.

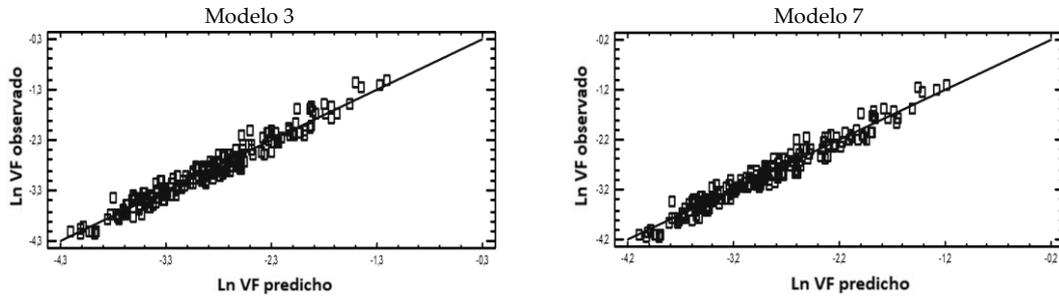


Figura 5. Representación del logaritmo natural del VF de los valores observados y los predichos correspondientes a los mejores modelos para plantaciones de *Neltuma alba* de Santiago del Estero.

Durante el proceso de validación los modelos examinados presentaron respuestas muy parecidas, cumpliendo los límites de exactitud y sesgo establecidos (Tabla 9). En consecuencia, ambos pueden usarse, aunque el modelo 3 es más parsimonioso y registra valores levemente inferiores de los estimadores estadísticos. De acuerdo al signo positivo del sesgo existe subestimación de los valores predichos por los modelos.

Tabla 9. Evaluación de parámetros estadísticos en la validación de los mejores modelos de estimación del volumen del fuste en función del diámetro basal para plantaciones de *Neltuma alba* de la provincia de Santiago del Estero.

	Mod 3	Mod 7
REMC	0,00812	0,00860
REMC %	15,35	16,26
DA	0,00134	0,00151
DA %	2,52	2,86

Los estadísticos de ajuste y gráficos de residuales de los dos modelos preseleccionados cumplen satisfactoriamente los requisitos de un adecuado ajuste. Considerando que el modelo 3 cumple los supuestos del modelo de regresión, sus consistentes estimadores de bondad de ajuste, la inexistencia de sesgo en la distribución de residuales, su capacidad predictiva, su moderada exactitud (error 15,35 %) y alta precisión (escaso sesgo = 2,52 %), indican que la función logarítmica representada por la ecuación $VF = EXP(0,560755 + 2,19704 * Ln DB)$, es válida como ecuación local para predecir y explicar la variabilidad del volumen de fuste (VF, en m³) en función del diámetro de la base (DB, en m), en el rango de 12 a 38 cm de DB. Debe destacarse que en la estimación del volumen de fuste usando la función logarítmica resulta mayor el error y el sesgo y menor el coeficiente de determinación ajustado, respecto de los obtenidos con idéntica función pero usando al diámetro normal como variable respuesta. Dicho resultado es esperable porque si bien en la determinación del volumen de fuste es importante el diámetro, también influyen otras variables como la altura del fuste, la densidad y la edad (García, 1995; Senilliani, 2021). A modo de ejemplo, puede citarse a Pérez *et al.* (2020) que para árboles individuales de plantaciones de *Prosopis alba* de la provincia de Santiago del Estero estimaron el volumen de fuste con base al diámetro normal y altura de fuste a través de funciones logarítmicas, en que el coeficiente de determinación ajustado fue > 99 %, error < 5 % y el sesgo < 1 %.

En la bibliografía forestal se cita con frecuencia la idoneidad de la función logarítmica para estimar el volumen del fuste. En este contexto, Diéguez *et al.* (2003) evaluando 6 especies forestales de España, Filio Bonilla (2010) estudiando plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Perú y Quiñónez *et al.* (2012) refiriéndose a 6 especies forestales de México, coinciden en afirmar que el modelo logarítmico (igual al modelo 3 de la presente investigación) es muy eficiente para la estimación del volumen con base a valores del diámetro del tocón.

Los resultados aquí referidos coinciden con la tendencia de las respuestas existentes en la compilación realizada por Maggio y Cellini (2016), quienes informan tres antecedentes vinculados con el género *Prosopis*, sin que en ningún caso se haya efectuado la validación de la ecuación resultante. 1) En una investigación realizada por Perpiñal *et al.* (1995) con árboles de *Prosopis flexuosa* el modelo ajustado fue logarítmico, igual al modelo 3 del presente estudio. 2) Kees y Gómez (2013) en la evaluación de 100 árboles de *Prosopis alba* de plantaciones del Chaco lograron la mejor respuesta con el modelo logarítmico (R^2 ajustado = 91,7). 3) En tanto que la función potencial, igual al modelo 8, resultó adecuada para la estimación del volumen en árboles de *Prosopis nigra* var. *ragonesei* (Conti *et al.*, 2008).

Por otro lado, Castro *et al.* (2017) informan que en un estudio exploratorio realizado en Formosa con árboles de una plantación de *Prosopis alba* se logró el mejor ajuste con el modelo $\ln V = b_0 + b_1 * DB + b_2 * DB^2$ (corresponde al modelo 7 del presente estudio).

4. CONCLUSIONES

En función del diámetro basal (x) la función logarítmica [$\ln y = b_0 + b_1 * \ln x$] explica satisfactoriamente la variación del diámetro normal y el volumen del fuste (y), en tanto la función potencial [$y = b_0 * x^{b1}$] solo es idónea en la modelación del diámetro normal. Presentan estadísticos con buenos ajustes por lo que resultan confiables su uso en la zona y especie estudiada.

Por la condición parsimoniosa de las ecuaciones resultantes, su aplicación operativa sería muy simple, pudiendo constituirse en una herramienta útil en inventarios y manejo de plantaciones de esta especie, para estimar el diámetro normal y volumen de fuste de árboles que han sido cortados y sólo permanece el tocón como referencia de sus dimensiones, actividad frecuente en peritajes, evaluación de incendios, hurtos, etc.

Considerando la solidez estadística de las ecuaciones generadas para árboles individuales de *N. alba*, y hasta tanto se disponga de estudios que cubran un rango más amplio de edad y tamaño de árboles y se incluyan plantaciones de otras áreas o zonas, se recomienda su utilización provisoria en plantaciones de la provincia de Santiago del Estero.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alder, D. 1980. *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos* vol. 2 - *Predicción del rendimiento*. Estudio FAO, Montes 22/2. 209 pp.
- Bava, J. O. y P. López Bernal. 2006. Predicción del diámetro a la altura de pecho en función de las dimensiones del tocón de árboles de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego, Argentina. *Revista Quebracho* 13: 87-92.

- Benítez, N. J. Y.; M. Rivero Vega; A. Vidal Corona; J. Rodríguez Rodríguez y R. C. Álvarez Rivera. 2004. Estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst. de La Provincia Camagüey, Cuba. *Revista Chapingo. Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 25 - 30.
- Bylin, C. V. 1982a. *Volume prediction from stump diameter and stump height of selected species in Louisiana*. USDA Forest Service, Research Paper SO-182. New Orleans. 11 pp.
- Bylin, C. V. 1982b. *Estimating dbh from stump diameter for 15 southern species*. USDA Forest Service, Research Note SO-286, 3 pp.
- Boletta, P. E. C. 2001. *Utilización de información agrometeorológica y satelital para la evaluación de la desertificación en el Chaco Seco, Departamento Moreno, Santiago del Estero*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. 119 p. https://fcf.unse.edu.ar/archivos/tesis/Tesis_Boletta.pdf
- Cancino, J. 2006. *Dendrometría básica*. Proyecto de desarrollo de la docencia, N° 04 - 034. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. 171 pp.
- Cisneros, A. B. y J. G. Moglia. 2017. *Prosopis alba*, alternativa sustentable para zonas áridas y semiáridas En: Giménez, A. M. y J. G. Moglia (Ed) *Los Bosques actuales del Chaco semiárido argentino. Ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva*: 231-248. Facultad de Ciencias Forestales. UNSE. Santiago del Estero, Argentina. ISBN: 978-987-4078-12-4.
- Cao, Q. V.; H. Burkhart; T. Max. 1980. Evaluation of two methods for cubic – volume prediction for loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science* 26(1): 71-80.
- Castro, M. R.; M. C. Cañete y V. R. Pérez. 2017. *Estimación del volumen de fuste a partir del diámetro del tocón en plantación de Prosopis alba Gris*. XX Jornadas de Ciencia y Técnica. 2 pp.
- Conti, G.; R. Coirini y R. Zapata. 2008. Funciones de estimación de volumen de *P. nigra* var. *ragonesei* (algarrobo amarillo) en un bosque del espinal santafesino. *Ciencia* 3(7): 39-51.
- Couto, H. T y S. C. Vettorazzo. 1999. Seleção de equações de volume e peso seco comercial para *Pinus taeda*. *Cerne* 5(1): 69-80.
- da Cunha, T. A. y C. A. Guimarães F. 2012. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 6(16): 26-40. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/400>
- Diéguez, A. U.; M. Barrio; F. Castedo y M. Balboa. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Ftiles* 12(2): 131-139.
- Emanuelli, P. y F. Milla. 2014. *Construcción de funciones de volumen. Volumen, Biomasa y Carbono Forestal* Nota técnica 4. REDD/CCAD-GIZ. La Libertad, El Salvador. 51 pp. http://www.reddccadgiz.org/monitoreoforestal/docs/mrv_2099067706.pdf
- Filio Bonilla, A. R. 2010. *Estimación del diámetro normal y volumen comercial a partir del diámetro y altura de tocones en plantaciones de Eucalyptus globulus Labill - Huanchar - Valle del Mantaro*. Tesis de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Nacional del Centro del Perú. 82 pp.
- Frediani, G. 1992. Aspectos económicos en la zona semiárida de Santiago del Estero. Repositorio de UNLP. Tomo XLVI, *Anales de Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, 105-115. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/30109/Documento_completo.pdf

- Galíndez, M. de J.; A. M. Giménez; N. Ríos y M. Balzarini. 2005. Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb. empleando dos modelos biológicos. Universidad Nacional de Santiago del Estero. *Revista de Ciencias Forestales, Quebracho* 12: 34-42.
- García, O. 1995. *Apuntes de mensura forestal*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 65 pp.
- García-Cuevas, X.; V. Herrera-Ávila; J. Hernández-Ramos; J. de J. García-Magaña y A. Hernández-Ramos. 2016. Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. Et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 95-103.
- García-Cuevas, X.; J. Hernández-Ramos; A. Hernández-Ramos; G. Quiñones-Barraza; J. C. Tamarit-Urias y G. G. García-Espinoza. 2017. Predicción del diámetro normal, altura y volumen a partir del diámetro del tocón en especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 8(43): 89-116.
- Kees, S. M. y C. A. Gómez. 2013. *Estimación del diámetro normal y volumen de fuste a partir del diámetro de tocón en forestaciones con Prosopis alba Griseb. en la provincia del Chaco*. IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú, Misiones. 9 pp.
- Maggio, A. D. y J. M. Cellini. 2016. *Recopilación de ecuaciones de volumen y biomasa de especies forestales de la República Argentina*. pp. 100-105.
- Meyer, H. A. 1944. *A correction for systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equation*. Pennsylvania State University, Forest Research Paper 7. 3 pp.
- Pérez, V. R.; M. R. Castro; C. D. Rodríguez; L. Arce y J. Mitre. 2020. Funciones de volumen de fuste para árboles individuales de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb. de Formosa y Santiago del Estero. Facultad Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. *Revista Yvyrareta* 28: 22-28.
- Perpiñal, E.; M. Balzarini; L. Catalán; L. Pietrarelli y U. 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.
- Piñones Cáceres, M. E. 2002. *Funciones de volumen para Prosopis alba Grisebach. en el valle de Quillagua, provincia de Tocopilla, Región de Antofagasta*. Trabajo final de Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca (Chile). 61 pp.
- Pompa-García, M.; H. M. de los Santos-Posadas; M. E. Zepeda-Bautista y J. J. Corral-Rivas. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia* 45: 379-387.
- Prodan, M.; R. Peters; F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura Forestal*. Agroamérica San José de Costa Rica. 586 pp.
- Quiñónez, B. G.; F. Cruz; B. Vargas y F. J. Hernández. 2012. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(9): 23-39.
- Rodríguez, F. y A. Fernández. 2009. Herramientas de cubicación sin necesidad de apeo de árboles. Montes. *Revista de ámbito forestal* 98: 83-88. <https://www.researchgate.net/publication/235428554>
- Senilliani, M. G. 2021. *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*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 125 pp.