



ECUACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURA Y VOLUMEN EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus dunnii* EN EL NORTE DE LA REGIÓN PAMPEANA

Paula FERRERE¹, Dino PALAZZINI^{2,4}, Ana María LUPI³, Pablo PATHAUER⁴

RESUMEN

Las ecuaciones de altura y volumen son una herramienta imprescindible para la planificación y la gestión de rodales forestales. *Eucalyptus dunnii* presenta un excelente potencial en la zona norte de la Región pampeana, debido a un buen crecimiento, rectitud de fuste y tolerancia al frío. El objetivo de este trabajo fue ajustar ecuaciones de altura y volumen total, con y sin corteza, para dicha especie. Se trabajó con árboles ubicados en plantaciones situadas en un radio de 150 km con epicentro en Castelar. Para la altura se midieron 438 ejemplares: 350 se emplearon en la construcción de modelos y 88 se emplearon para validación. Para las ecuaciones de volumen se cortaron 71 árboles: 56 se usaron para el ajuste del modelo y 15 para su validación. Se evaluó la capacidad de predicción de ecuaciones de altura-volumen de amplio uso en la bibliografía, mediante técnicas de regresión lineal y no lineal. Las ecuaciones presentaron buenos ajustes. Para la altura se utilizó un modelo ln-ln que emplea como variable independiente el diámetro a la altura del pecho (dap) y la edad. Mientras que para el volumen se seleccionó el modelo de Schumacher, con dap y altura como variables regresoras. El rango de aplicación de los modelos comprende edades entre los 3 y 13 años, dap entre 3,2 cm y 45,2 cm, alturas entre 4,1 m y 41,7 m.

Palabras clave: ecuación de altura, ecuación de volumen, *Eucalyptus dunnii*, región pampeana

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, el género *Eucalyptus* ocupa el segundo lugar en cuanto a la superficie total cultivada (<https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>). Si bien *Eucalyptus grandis* W. Hill es la especie predominante, *Eucalyptus dunnii* aparece como una alternativa de interés debido a su alta productividad y buena rectitud de fuste, siendo menos susceptible que el anteriormente mencionado, a las heladas y al estrés hídrico. Esta especie, cultivada comercialmente en Brasil, Sudáfrica, China y Australia, fue introducida en nuestro país en el año 1975 con el objetivo de evaluar su adaptabilidad, crecimiento y productividad como una alternativa en la producción de madera con destino a triturado para celulosa y tableros en el NE de Buenos Aires y SE de Santa Fe (Gea, 1986). A pesar de su importancia, aún no se disponen de modelos de crecimiento y producción para esta región. Como antecedentes se pueden mencionar a Barth et al. (2000), quienes trabajaron en la zona Garuhape, Misiones y más recientemente Achinelli et al. (2017) determinaron el crecimiento en 30 parcelas ubicadas en la región norte de la depresión del Salado. El objetivo de este trabajo fue ajustar ecuaciones de altura y de volumen total con y sin corteza, para dicha especie en la zona norte de la provincia de Buenos Aires y el SE de Entre Ríos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron mediciones sobre 26 plantaciones operativas, parcelas demostrativas y ensayos con *E. dunnii*, localizados en el centro norte de la provincia de Buenos Aires y sureste de Entre Ríos (en un radio de 200 km aproximadamente desde CABA). Los sitios de muestreo (Cuadro 1) incluyeron una

¹ AER 9 de Julio, EEA Pergamino. Mail: ferrere.paula@inta.gob.ar

² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP/ Mail: palazzini.dino@inta.gob.ar

³ Instituto de Suelos, CIRN, INTA Castelar. Mail: lupi.ana@inta.gob.ar

⁴ Instituto de Recursos Biológicos, CIRN, INTA Castelar. Mail: pathauer.pablo@inta.gob.ar



amplia variedad de plantaciones pertenecientes a las empresas: Coldrige SA, Daglom SA, Fiplasto SA, Arauco Argentina SA, Establecimientos La Negra SA y El Potrero de San Lorenzo SA, establecidas en cercanías de las localidades de Carlos Keen, Jaúregui, Castilla, Carmen de Areco, Ramallo, Zarate (Buenos Aires) y Gualaguaychú (Entre Ríos). Las plantaciones seleccionadas para los relevamientos están distribuidas en edades que van desde los 3 a los 13 años conformando una cronosecuencia que abarcaría una rotación forestal típica para la región de estudio. De esta manera se asume que representan el estado de desarrollo característico de la misma a esa edad.

En cada rodal se instalaron 3-4 parcelas de muestreo cuadradas, temporarias de una superficie de 400 m². Se midieron todas las circunferencias a la altura del pecho (CAP), la altura total (h) y la altura de la copa verde de 6 individuos por parcela (4 del CAP máximo, 1 del medio y 1 mínimo). Las mediciones de CAP se realizaron con una cinta métrica estándar y las de altura con un clinómetro Suunto/hipsómetro Vertex. En total se midieron 438 pares CAP-h, destinándose 350 para el ajuste de los modelos y 88 para la validación de los mismos. Se realizó un muestreo destructivo de 71 árboles seleccionados de manera aleatoria para incluir todos los sitios de estudio (56 para ajuste de modelos y 15 para validación). La toma de los datos en cada individuo incluyó las siguientes variables: diámetro a la altura del pecho (dap) con corteza (cm), altura total en metros (H), diámetro con y sin corteza (cm), (d) para cada sección del fuste cada 2 metros y su altura relativa.

Se ajustaron modelos de estimación de altura y volumen individual (Cuadro 1), de uso más difundido en la bibliografía. En el caso de la altura se emplearon modelos lineales, mientras que para la estimación del volumen con y sin corteza, se consideró un modelo no lineal (4).

Cuadro 1. Ecuaciones de altura y volumen puestas a prueba para *E. dunnii*

Variable a estimar	Modelo
Altura	1) $h=a+b*dap$
	2) $h=a+b*(dap)+c*(edad)$
	3) $\ln h=a+b*\ln(dap)$
	4) $\ln h=a+b*\ln dap+c*\ln(edad)$
Volumen	1) $\ln v=a+b*\ln(dap)$
	2) $\ln v=(a+b*\ln(dap)+c*\ln(h))$
	3) $v=a+b*dap^2*h$
	4) $v=a*dap^b*h^c$

La evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza (homocedasticidad) se realizó mediante el análisis gráfico de los residuos de cada modelo. Se empleó el gráfico cuantil-cuantil (Q-Q plot), usando como distribución teórica la normal y un gráfico de residuos estudentizados vs. valores estimados (r.e. vs. v.e.) (Myers y Myers, 1986). La evaluación de la bondad de ajuste de los modelos se basó en la obtención del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME). Además, se tuvo en cuenta la significancia de los parámetros ($\alpha=0,05$) y el número de parámetros del modelo (principio de simplicidad). Según estos criterios, se busca que el R^2_{aj} sea lo más elevado posible, el RCME presente el menor valor, y el número de parámetros sea el menor posible. La evaluación de la capacidad predictiva de las ecuaciones de volumen ajustadas se llevó a cabo utilizando una muestra de 15 individuos (20 % del total) que no formaron parte de la muestra con la cual se realizaron los ajustes. Se calcularon el sesgo (\bar{E}) y la media de los valores absolutos de los residuos (MAR, $|\bar{E}|$) (Castedo y Alvarez, 2000). Los análisis estadísticos se realizaron con Infostat 2011 (Di Rienzo et al., 2008).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todas las variables predictoras en las ecuaciones de altura y volumen resultaron significativas. En el análisis gráfico de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza (Figura 1) no se detectaron evidencias que hicieran suponer un incumplimiento de los supuestos para el caso de la variable altura. La misma tendencia se registró en las ecuaciones de volumen (datos no mostrados).

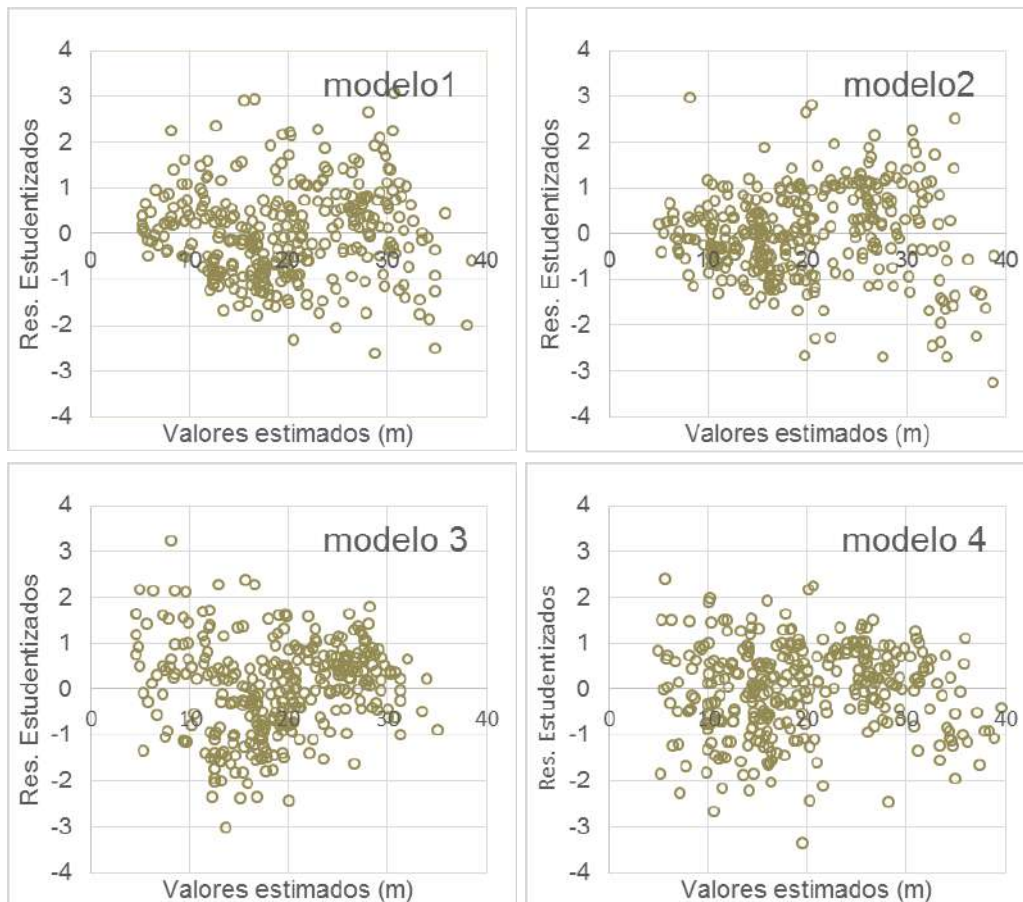


Figura 2. Relación entre los valores estimados y los residuos estudentizados.

En el caso de la altura los modelos obtenidos poseen un grado de precisión muy similar (Cuadro 2). Las diferencias observadas en los estadísticos de bondad de ajuste entre los modelos resultaron mínimas, siendo el modelo 4 levemente superior al resto, en concordancia con lo reportado por Barth et al. (2017), quienes también emplearon el dap y la edad como variables regresoras. Para los modelos considerados, la RCME varió entre 1,69 y 2,10, el R^2_{aj} entre 79 y 91 %. De acuerdo con el sesgo, se observa que todos los modelos sobreestiman la altura, pero la magnitud del modelo 4 fue ostensiblemente menor al resto de los modelos.

Tabla 2. Ecuaciones alométricas para la estimación de altura total y volumen en árboles de *E. dunnii*.

Y	a	b	c	R ₂ adj	RMSE	Sesgo	Mar	p(a)	p(b)	p(c)
	2,63384	0,82775		0,82	2,099	-0,040	0,82	<0.001	<0.001	
	-6,08112	0,63000	1,06479	0,89	1,741	-0,014	0,61	<0.001	<0.001	<0.001
	-4,85203	0,82775		0,79	2,099	-0,040	0,82	<0.001	<0.001	
h	0,38737	0,56439	0,47379	0,91	1,693	-0,004	0,60	<0.001	<0.001	<0.001
	-9,17637	2,69711		0,97	0,011	0,017	0,06	<0.001	<0.001	
	-9,04364	1,77118	0,83323	0,99	0,007	-0,051	0,06	<0.001	<0.001	<0.001
	-0,02347	0,00003		0,99	0,351	0,451	0,49	<0.001	<0.001	
vcc	0,00007	1,73704	1,03774		0,005	-0,023	0,05	<0.001	<0.001	<0.001
	-9,64156	2,782570		0,96	0,009	0,016	0,054	<0.001	<0.001	
	-9,48137	1,665110	1,005580	0,98	0,006	0,015	0,036	<0.001	<0.001	<0.001
	-0,00788	0,00002		99	0,003	0,017	0,033	<0.001	<0.001	
vsc	0,00003	1,698830	1,275020		0,002	-0,012	0,029	<0.001	<0.001	<0.001

Y: variable estimada, h: altura total (m), volumen con corteza (m³) volumen con corteza (m³); a, b y c: parámetros estimados. Estadísticos: R₂, coeficiente de determinación ajustado; RMSE: raíz del cuadrado medio del error, E⁻ Sesgo; MAR: media de los valores absolutos de los residuos.



En cuanto a la estimación de volumen con y sin corteza, el modelo 3, que considera el fuste afectado por un factor de forma, fue el que mayor RCME y sesgo presentó, por lo que fue descartado. Los modelos 2 y 4 mostraron los menores RCME y sesgo. El modelo no lineal (4) cumple las recomendaciones resumidas por Vanclay (1994): tener pocos parámetros, permitir una interpretación biológica, ser flexible brindando buenos resultados ante escenarios distintos y ser simple de aplicar. En su trabajo Barth et al. (2017) optaron por el modelo 2, que en definitiva es una versión lineal del modelo 4. En el presente reporte, todos los estadísticos considerados fueron ligeramente superiores en el modelo 4.

4. CONCLUSIONES

Las ecuaciones ajustadas en el presente trabajo permiten estimar la de altura y el volumen (con y sin corteza) de individuos de *Eucalyptus dunnii* de la zona norte de la región pampeana. El modelo más adecuado para estimar la altura es $\ln h = 0,38737 + 0,56439 * \ln dap + 0,47379 * \ln edad$. Para el volumen con corteza (vcc) y sin corteza (vsc) los modelos recomendados son: $vcc = 0,00007 * dap^{1,73704} * h^{1,03774}$ $vsc = 0,00003 * dap^{1,69883} * h^{1,275020}$.

5. AGRADECIMIENTOS

A los agentes Tulio Pisetta y Gonzalo Galasso del IRB (CIRN, INTA Castelar) por la colaboración en las tareas de campo. Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos PEI016, PE146 y por las empresas involucradas.

6. BIBLIOGRAFIA

- ACHINELLI, F. G., GALARCO, S., PÉREZ, F., CIOCCHINI, R. G., GONZÁLEZ, A., & DONNA, F. 2017. Crecimiento de *Eucalyptus dunnii* Maiden en el noreste de la Pampa Deprimida de Buenos Aires. *XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos (Concordia, 2017)*.
- BARTH, S. R., FASSOLA, H. E., FERRERE, P., ALLEGRANZA, D., & PAHR, N. 2002. Modelos de crecimiento y producción de *Eucalyptus dunnii* (Maid) en la zona de Garuhapé, Misiones.
- DI RIENZO, JULIO & CASANOVES, FERNANDO & BALZARINI, MÓNICA & GONZALEZ, LAURA & TABLADA, MARGOT & ROBLEDO, CARLOS. 2008. InfoStat Versión 2011.
- DORADO, F. C., & GONZALEZ, J. A. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. *Forest Systems*, 9(2), 253-268.
- GEA L. 1986. Revisión de ensayos de *Eucalyptus spp.* en Buenos Aires y Santa Fe. Seminario CIEF del 23/06/1986. Informe Interno (inédito). Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales. Buenos Aires, Argentina, 33 pp.
- MARLATS R., PEREZ F. 1991. Selección de especies, orígenes y procedencias de *Eucalyptus*, resistentes a bajas temperaturas en plantas de vivero para el norte de la depresión del Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista INIA* 1991:151-161.
- MYERS, R. H., & MYERS, R. H. 1990. *Classical and modern regression with applications*, 2, 488 pags. Belmont, CA: Duxbury press.
- VANCLAY, J. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*