

MODELOS DINÁMICOS DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DE LA EDAD: CRECIMIENTO EN DIÁMETRO DE *QUERCUS ILEX* L. EN DEHESAS

Guillermo Gea Izquierdo, Isabel Cañellas Rey de Viñas, Enrique Garriga García y Gregorio Montero González

Departamento Sistemas y Recursos Forestales. CIFOR-INIA. Ctra. La Coruña km 7,5. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: guigeiz@inia.es

Resumen

Quercus ilex (encina) es la especie arbórea más representada en las dehesas y la frondosa más extendida en España. Pese a ello, no existen modelos de crecimiento publicados para esta especie en el oeste peninsular que nos permitan simular el crecimiento de estas masas así como predecir estructuras y producciones futuras. En este trabajo se estudia el crecimiento en diámetro de la encina en las dehesas, comparando modelos dinámicos dependientes e independientes de la edad y discutiendo su aplicabilidad y la distribución del error medio. En los modelos independientes de la edad el error aumentó respecto a los modelos dependientes de la edad, aunque se mantuvo menor del 15% en las clases diamétricas entre 15 y 50 cm. Por ello consideramos que su uso puede resultar muy interesante cuando no se conozca la edad de los árboles estudiados (la práctica totalidad de los casos), aceptando que el error cometido es mayor que en modelos que incluyen la edad como covariable. Se muestra además cómo resulta indispensable analizar el error con los parámetros ajustados teniendo en cuenta la autocorrelación serial, pero sin incluir el término autoregresivo. En estructuras de datos tan autocorrelacionados como las que se usan en análisis de crecimiento en diámetro cuando se analizan secciones del fuste, la influencia del término autoregresivo enmascara el comportamiento predictivo, pudiendo falsear la selección de los modelos.

Palabras clave: *Encina, GADA, Ecuaciones en diferencias independientes edad, Dehesa*

INTRODUCCIÓN

La dehesa es un sistema agroforestal compuesto por un estrato arbóreo abierto y disperso conjuntamente con un estrato herbáceo aprovechado por el ganado doméstico y/o silvestre, con cultivos y matorral intercalados, que se extiende por más de 3 millones de ha del Oeste Peninsular (SAN MIGUEL, 1994). El crecimiento de la especie principal (encina) ha sido escasamente estudiado en comparación con otras especies de sistemas típicamente forestales debido, entre otros moti-

vos, a que la madera de encina no es el producto principal de estos sistemas agrosilvopastorales. Así, no existen modelos de crecimiento para la especie en los encinares sobre suelos ácidos del oeste peninsular, a diferencia de los encinares de monte bajo (con gestión y ecología diferente) mediterráneos del este Peninsular, donde existen múltiples estudios y modelos detallados sobre su crecimiento y dinámica (RODÁ *et al.*, 1999). Además, otra causa por lo que no se ha estudiado el crecimiento en diámetro de la encina es la dificultad de diferenciar los anillos de crecimiento, sin

embargo se ha demostrado que se pueden reconocer patrones de crecimiento anuales en la especie (CHERUBINI et al., 2003).

El concepto de dominancia y su relación con la fertilidad (clima, suelo) de un rodal ha sido aplicado tradicionalmente en los sistemas forestales mediante el índice de sitio, calculado a partir de ecuaciones de altura dominante en función de la edad. En la actualidad, la relación entre la edad y la altura dominante se modeliza usando formulaciones GADA (“*generalized algebraic difference approach*”) (CIESZEWSKI & BAILEY, 2000). En sistemas arbolados abiertos (máxime si existen podas), la aplicación del índice de sitio basado en altura dominante puede carecer de sentido biológico al no existir una estratificación de copas como en bosques cerrados, siendo generalmente reducida o inexistente la competencia por luz. Se puede considerar que los árboles aislados tienden a incrementar el tamaño de sus copas, creciendo menos en altura que los árboles que se han desarrollado en rodales espesos pero creciendo más en diámetro. Por tanto, se suele considerar que los árboles que han crecido sin competencia exhiben un crecimiento en diámetro potencial (HASENAUER, 1997). Por otro lado, la dificultad de estimar la edad, hace recomendable probar otras opciones a las ecuaciones en crecimiento clásicas (dependientes de la edad [ZEIDE, 1993]), tales como las ecuaciones en diferencias independientes de la edad propuestas por TOMÉ et al. (2006).

En este trabajo se desarrollan modelos de crecimiento en diámetro para el encina y se discute la distribución de errores de los mismos así como la aplicabilidad de los modelos en diferencias independientes de la edad de crecimiento en diámetro, en un caso donde los modelos dependientes de la edad son difíciles de aplicar (ya por dominancia, ya por estimación de edad) como es el caso de la encina en las dehesas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se seleccionaron 25 parcelas de radio variable de 10 árboles cada una en un encinar situado entre Fuentes de Oñoro y Ciudad Rodrigo (Salamanca), en las que se midieron diámetro, altura total, diámetros de copas, distancias y rumbos de cada pie, apeándose los cinco árboles

centrales de cada parcela (125 árboles). En este trabajo comparamos varias parametrizaciones GADA (Tabla 1) dependientes de la edad con otras dos parametrizaciones independientes de la edad (Tabla 1). Los modelos dependientes de la edad se comparan expandidos y sin expandir por la densidad del rodal (pies.ha⁻¹). En los independientes de la edad, para crear una familia de curvas, en T1 se expandieron los parámetros por la densidad del rodal, mientras en T2s se expandieron por densidad y el índice de sitio propuesto por GEA IZQUIERDO et al. (2008). La formulación T2s la denominamos ‘pseudo-independiente’ de la edad ya que es necesario estimar el índice de sitio para utilizarla. Finalmente, suponemos que la densidad en este ecosistema no ha variado sensiblemente al menos en los últimos 50 años (GARCÍA DEL BARRIO et al., 2004).

Todos los modelos se ajustaron con una estructura de error autoregresiva de orden 2 (AR(2)). Los modelos se compararon usando la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE), el sesgo, la eficiencia o coeficiente de determinación ajustado y el AICd (Criterio de información de Akaike en diferencias, BURNHAM & ANDERSON, 2004). Una vez estimados los parámetros mediante el ‘dummy approach’ (CIESZEWSKI et al., 2000) los estadísticos se calcularon para las ecuaciones de ajuste (estimación) incluyendo el AR(2) y posteriormente para las ecuaciones de ‘predicción’ (autovalidación), sin la estructura AR(2). Los modelos independientes de la edad se ajustaron usando una estructura de datos incluyendo solamente los intervalos ascendentes. Se usó PROC MODEL de SAS (SAS INSTITUTE, 2004) en todos los cálculos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran las características de los pies y los rodales muestreados y en las figuras 1 y 2 los modelos seleccionados, siendo todos los parámetros significativos (tests no mostrados). El mejor modelo fue E1 (Tabla 3), GADA Hossfeld IV no expandido por densidad, no justificándose expandir los parámetros al no añadir más poder explicativo, ni reducir el error. Se observa (Tabla 3) cómo es necesario analizar los estadísticos de ajuste sin la

Ecuación base	Parámetros relacionados con el sitio	Solución para X	Ecuación Dinámica
Hosfeld IV $y = \frac{t^c}{b + at^c}$	$a = X$ $b = b_1 X$	$X_0 = \frac{t_1^c / y_1}{b_1 + t_1^c}$	$y_2 = \frac{t_2^c}{X_0 \cdot (b_1 + t_2^c)}$
	$a = X$ $b = (b_1 + b_d \cdot N) \cdot X$	$X_0 = \frac{t_1^c / y_1}{(b_1 + b_d \cdot N) + t_1^c}$	$y_2 = \frac{t_2^c}{X_0 \cdot ((b_1 + b_d \cdot N) + t_2^c)}$
	$a = (a_{d1}/N)$ $b = (b_{d1} \cdot N)$	$t_1 = \sqrt[c]{\frac{y_1 \cdot b}{(1 - a \cdot y_1)}}$	$y_2 = \frac{(t_1 + \text{dif})^c}{b + a \cdot (t_1 + \text{dif})^c}$
	$a = (a_{d1}/N) + (a_{s1} \cdot IS)$ $b = (b_{d1} \cdot N) + (b_{s1} \cdot IS)$	$t_1 = \sqrt[c]{\frac{y_1 \cdot b}{(1 - a \cdot y_1)}}$	$y_2 = \frac{(t_1 + \text{dif})^c}{b + a \cdot (t_1 + \text{dif})^c}$
Lundqvist-Korf $y = a \cdot \exp(-b \cdot t^{-c})$	$a = \exp((a_1 + a_d \cdot N) \cdot X)$ $b = X$	$X_0 = \frac{\ln(y_1)}{(a_1 + a_d \cdot N) - t_1^{-c}}$	$y_2 = \exp((a_1 + a_d \cdot N) \cdot X_0) \cdot \exp(-X_0 t_2^{-c})$
Bertalanffy - Richards $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot t))^c$	$a = \exp((a_1 + a_d \cdot N) \cdot X)$ $c = X$	$X_0 = \frac{\ln(y_1)}{(a_1 + a_d \cdot N) + F_0}$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_1))$	$y_2 = \exp((a_1 + a_d \cdot N) \cdot X_0) \cdot (1 - \exp(-bt_2))^{(X_0)}$

Tabla 1. Modelos y parametrizaciones utilizadas en el presente trabajo. Densidad en pies/ha; IS=índice de sitio correspondiente a 49 (I), 40 (II), 31 (III) y 22 (IV) cm de diámetro a 1,30 m (GEA IZQUIERDO et al., 2008). N=Densidad (pies/ha); Dif=Edad₂-Edad₁

	DAP cc (cm)	DAP sc (cm)	Edad 1,30 m	Edad en la base	Densidad parcela	BA parcela
Media	30,81	35,0	77	89	129,9	9,5
CV	42,2	40,0	37	32	29,2	41,5
Moda	-	-	76	93	-	-
Máximo	76,1	65,0	169	175	210,4	18,0
Mínimo	10,3	9,3	19	26	39,5	4,6
n	125	115	117	112	25	250

Tabla 2. Características de la muestra, 25 parcelas, 5 pies centrales. DAP=diámetro normal (1,30 m); BA=área basal métrica (m².ha⁻¹); cc=con corteza; sc=sin corteza

estructura AR(2) ('predicción') para mostrar la capacidad predictiva del modelo ajustado: si hubiésemos analizado sólo los estadísticos de estimación los modelos independientes de la edad serían ligeramente mejores que los dependientes de la edad (GADA), cuando se ve en los parámetros de predicción y en la figura 3 cómo el error 'en predicción' se incrementa notablemente en T1 y T2s respecto a E1. Esto sería resultado de la alta correlación que presentan las estructuras de datos resultantes del análisis de secciones y por tanto de la influencia del término AR(2). T2s se comportó mejor

que T1, lo cual quiere decir que el uso del índice de sitio aporta información a este modelo, análogamente a TOMÉ et al. (2006). Resaltar que la densidad también sea significativa en T1 y T2s (tests no mostrados) y que, pese a que se incrementa el error respecto a los GADA en las clases diamétricas centrales (las más abundantes en las dehesas, [PULIDO et al., 2001], el error es aceptable. Esto posibilitaría su uso, habida cuenta de las dificultades que encierran el usar modelos dependientes de la edad.

En la figura 4 se muestran los errores según el intervalo de predicción que se use: se aprecia

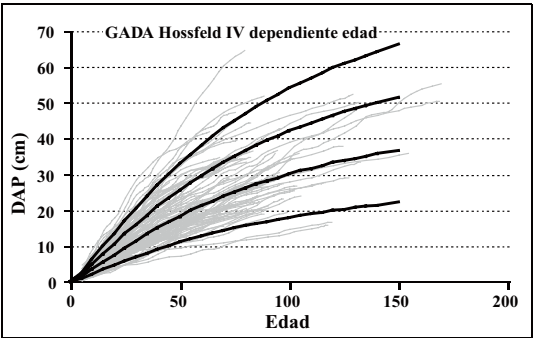


Figura 1. Familia de ecuaciones de la formulación GADA calculada a partir de la ecuación Hossfeld IV (E1) para diámetros normales 15, 25, 35 y 45 cm a los 75 años

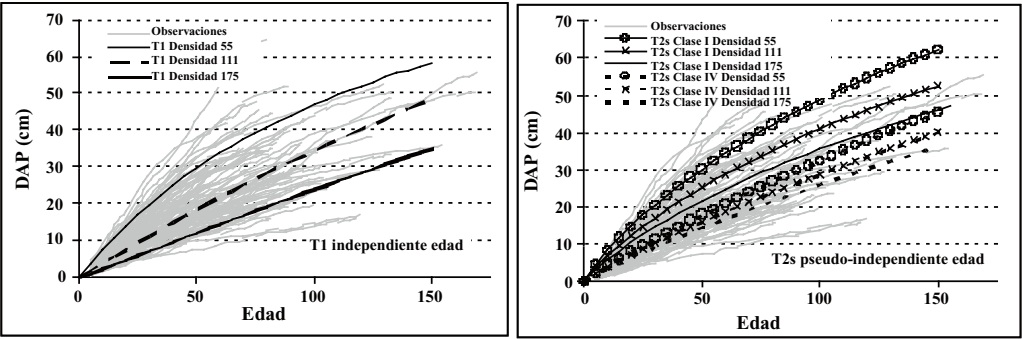


Figura 2. Simulaciones de los modelos T1 para las densidades 55, 111 y 175 pies.ha⁻¹, y T2s para las densidades 55, 111 y 175 pies.ha⁻¹, Clases I y IV de GEA IZQUIERDO et al. (2008)

Id	Estimación			Predicción			
	RMSE	Adj. R ²	AICd	Sesgo	RMSE	EF	AICd
E1	0,7212	0,9961	0,3	-0,0458	1,7225	0,9780	0,0
E1d	0,7213	0,9961	0,0	0,0470	1,7763	0,9780	2,4
E2d	0,7256	0,9961	23,2	-0,0346	1,8641	0,9757	176,9
E3d	0,7301	0,9960	45,5	-0,0559	1,9314	0,9726	220,0
T1	0,6776	0,9966	955,8	0,5875	4,5949	0,8429	4849,0
T2s	0,6566	0,9968	0,0	0,2573	3,9120	0,8859	0,0

Tabla 3. Estadísticos de estimación y predicción. Los AIC de los modelos independientes de la edad no se pueden comparar con los dependientes de la edad al estar ajustados con diferente estructura de datos

cómo para intervalos menores de 25 años todos los modelos se encuentran por debajo del 15%.

En dehesas, en caso de existir, resulta un problema definir dominancia basada en el crecimiento en altura ya que los árboles son podados y las densidades son bajas. Por esta razón se han

analizado los pies suponiendo que todos son dominantes-codominantes, aceptando que no se comete mucho error sobre todo en los rodales más abiertos. En T2s usamos un índice de sitio basado en crecimiento en diámetro (GEA-IZQUIERDO et al., 2008) considerando que esto es

Id	Parámetros					
	a_{d1}	a_{s1}	b_1	b_{d1}	b_{s1}	c
E1	-	-	273,2923 (15,128)	-	-	1,248261 (0,0234)
T1	0,505583 (0,0118)	-	-	0,025352 (0,000987)	-	1,030452 (0,00847)
T2s	-0,09612 (0,0163)	0,000155 (0,0000)	-	0,003258 (0,0003)	35,3518 (1,7675)	0,893465 (0,0083)

Tabla 4. Parámetros estimados para los modelos. En paréntesis se muestra el error estándar estimado para los parámetros

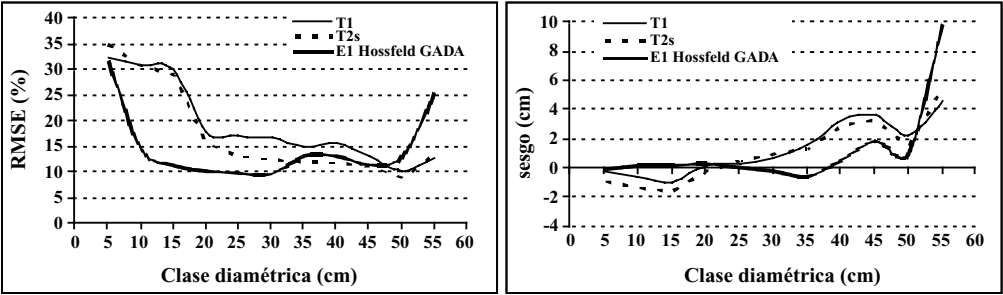


Figura 3. Raíz cuadrada del error medio cuadrático relativo (RMSE) y sesgo en predicción para T2, T5s y E1 (Hossfeld IV GADA) para cualquier árbol encontrado en la masa (suponemos codominancia en dehesas)

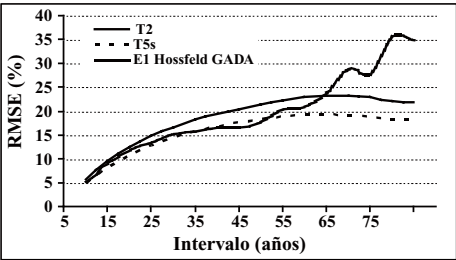


Figura 4. Raíz cuadrada del error medio cuadrático relativo (RMSE) para E1, T1 y T2s según intervalos crecientes de predicción

una hipótesis aceptable en sistemas arbolados abiertos, como hemos comentado.

Los modelos no deben usarse fuera del rango de estimación, ni para edades menores de 25 años o diámetros menores de 10 cm (Figura 3). Se aprecia en la figura 2 cómo las curvas independientes de la edad no presentan forma sigmoide al ser representadas en función del tiempo, tendiendo T1 en densidades altas a tener un comportamiento lineal. A su vez también, habría que investigar la influencia de la estruc-

tura de datos en los modelos finales y la distribución del error. Teniendo en cuenta lo previamente discutido, consideramos que los modelos propuestos resultan de gran interés para la gestión forestal de los sistemas adehesados por no existir ningún estudio precedente en la especie y por la dificultad de conseguir buenas muestras procedentes de parcelas caracterizadas dasométricamente. Además, es previsible que los modelos independientes de la edad mejoraran sensiblemente su comportamiento si se incluye-

ran variables de suelo o clima (TOMÉ et al., 2006). Los modelos deben ser validados con muestras mayores procedentes de un rango geográfico más amplio.

Agradecimientos

Agradecemos a Rafael Calama, Lourdes Cruz y PyG su indispensable ayuda para conseguir las muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- BURNHAM, K.P., & ANDERSON, D.R.; 2004. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research* 33: 261-304.
- CHERUBINI, P.; GARTNER, B.L.; TOGNETTI, R.; BRÄKER, O.U.; SCHOCH, W. & INNES, J.L.; 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological Reviews* 78: 119-148.
- CIESZEWSKI, C. & BAILEY, R.L.; 2000. Generalized algebraic difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46: 116-126.
- CIESZEWSKI, C.; HARRISON M. & MARTÍN S.; 2000. *Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models*. Daniel B. Warnell School of Forest Resources. University of Georgia. Athens. Georgia.
- GARCÍA DEL BARRIO, J.M.; BOLAÑOS, F.; ORTEGA, M. & ELENA-ROSSELLÓ, R.; 2004. Dynamics of land use and land cover change in dehesa landscapes of the 'REDPARES' network between 1956 and 1998. *Advances in Geoecology* 37: 47-54.
- GEA IZQUIERDO, G.; CAÑELLAS, I. & MONTERO, G.; 2008. Site index in agroforestry systems: age-dependent and age-independent dynamic diameter growth models for *Quercus ilex* in Iberian open oak woodlands. *Can. J. For. Res.* 38: 101-113.
- HASENAUER, H.; 1997. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. *Forest Ecol. Manage.* 96: 197-206.
- PULIDO, F.J.; DÍAZ, M., & HIDALGO DE TRUCIOS, S.J.; 2001. Size structure and regeneration of Spanish holm oak *Quercus ilex* forests and dehesas: effects of agroforestry use on their long-term sustainability. *Forest Ecol. Manage.* 146: 1-13.
- RODÁ, F.; RETANA, J.; GRACIA, C.A. & BELLOT, J. (Eds.); 1999. *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Springer. Berlin.
- SAN MIGUEL, A.; 1994 *La dehesa española: origen, tipología, características y gestión*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- SAS INSTITUTE INC.; 2004. *SAS/ETS 9.1 User's guide*. SAS Institute Inc. Cary. NC.
- TOMÉ, J.; TOMÉ, M.; BARREIRO, S. & PAULO, J.A.; 2006. Age-independent difference equations for modelling tree and stand growth. *Can. J. For. Res.* 36: 1621-1630.
- ZEIDE, B.; 1993. Analysis of Growth Equations. *For. Sci.* 39: 594-616.