

MODELO DE CRECIMIENTO DIAMETRAL PARA *Juniperus thurifera* L. EN LA PROVINCIA DE SORIA.

Turrientes Calzada, A.¹; Adame Hernando, P.¹; Alonso Ponce, R.²; García González, M.D.¹.

¹ *Departamento de Investigación y experiencias forestales de Valonsadero. Junta de Castilla y León. Apdo 175, 42080 SORIA (España).*

² *Centro de Investigación Forestal (INIA). C^a La Coruña km 7,5. 28040-MADRID (España).*

Resumen El objetivo principal de este estudio es realizar un modelo de crecimiento diametral independiente de la distancia para árbol individual de la sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) Para el ajuste de este modelo se han utilizado datos de 60 parcelas situadas en los montes Velasco y Valdoco (MUP nº 362 y nº 328) pertenecientes al término municipal de Burgo de Osma (Soria). Las variables explicativas que se han probado para ajustar el modelo pueden agruparse en: variables de tamaño (diámetro), competencia (tratamiento selvícola y relación entre el diámetro y el diámetro medio cuadrático), masa (altura dominante, diámetro dominante, densidad y área basimétrica) y sitio (calidad de estación). La selección de este modelo se ha realizado observando los valores del coeficiente de correlación (R^2) y el error medio cuadrático (MSE). Además se tuvo en cuenta que las variables fuesen significativas y con un comportamiento biológico coherente con el crecimiento en diámetro. Para evaluar el modelo propuesto, se ha llevado a cabo un análisis de la bondad del ajuste, tres validaciones cruzadas y un análisis gráfico de los residuos.

Palabras clave: *Sabina, Modelo independiente de la distancia, Modelo de crecimiento en diámetro.*

DIAMETER GROWTH MODEL FOR JUNIPER (*JUNIPERUS THURIFERA* L.) IN SORIA (SPAIN)

Abstract The main objective in this work is to develop a distance-independent diameter growth model for Spanish juniper (*Juniperus thurifera* L.). Data from 60 plots, situated in Velasco and Valdoco woodlands (MUP no. 362 and 328) belonging to the Burgo de Osma council town (Soria), have been used to fit this model. The explanatory variables that have been proved to fit the model can be grouped into four categories: size variables (diameter at breast height), competition (silvicultural treatment and relationship between diameter at breast height and quadratic mean diameter), stand (dominant height, dominant diameter, density and basal area) and site condition (site index). The selection of the best model has been carried out by taking into account the values of the correlation coefficient (R^2) and the quadratic mean error (MSE). Besides, the variables had to be significant and biologically coherent with the diameter growth. The model has been evaluated through performance evaluation statistical criteria, three cross validation and graphic analysis of the residuals.

Key words: *juniper, distance-independent model, diameter growth model.*

MODELE DE CROISSANCE DIAMETRALE POUR *Juniperus thurifera* L. DANS LA PROVINCE DE SORIA (Espagne).

Résumé Cette étude a pour objectif principal de réaliser un modèle de croissance diamétrale indépendant de la distance, afin de prévoir la croissance individuelle du Genévrier Thurifère (*Juniperus thurifera* L.). Pour établir ce modèle, les relevés de 60 parcelles situées sur les monts Velasco et Valdoco (Catalogue d'Utilité Publique C.U.P n° 362 e n°328), appartenant à la commune du Burgo de Osma (Soria), ont été utilisés. L'on peut considérer quatre groupes formés par les variables qui ont servi à établir ce modèle: variables de taille (diamètre), compétition (traitement sylvicole et relation entre le diamètre et le diamètre moyen quadratique), masse (hauteur dominante, diamètre dominant, densité et aire basimétrique), et qualité de la saison. Ce modèle a été sélectionné en observant les valeurs du coefficient de corrélation (R^2) et l'erreur moyenne quadratique (MSE). De plus, l'on a pris en compte le fait que les variables étaient significatives et avaient un comportement biologique cohérent avec la croissance en diamètre. Pour évaluer le modèle proposé, l'on a réalisé l'analyse graphique des résidus, l'évolution de la croissance en ce qui concerne les variables dépendantes choisies et par le biais d'une validation croisée

Mots-clefs: Genévrier Thurifère, *Juniperus thurifera* L., indépendant de la distance, modèle de croissance en diamètre.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo científico forma parte de un conjunto de estudios que sobre la sabina (*Juniperus thurifera* L.) se han venido realizando en el Departamento de Investigación y Experiencias Forestales de Valonsadero, dependiente de la Junta de Castilla y León.

La sabina es una de las especies forestales con requerimientos ambientales menos exigentes, ya que puede soportar diversos tipos de estrés: hídrico, térmico (tanto por frío como por calor), edáfico y con manifestaciones de todos ellos de gran intensidad. (COMIN, 1985). Se encuentra en climas secos, fríos y luminosos, presentando cierta indiferencia ante el tipo de suelo, aunque en la Península Ibérica se sitúa casi exclusivamente sobre suelo calcáreo (CEBALLOS y RUIZ, 1979).

El enebro o sabinar es una de las masas forestales más singulares de la Península Ibérica. Tiene sus núcleos principales en las montañas interiores del centro, norte y este, principalmente en las provincias de Soria, Guadalajara, Burgos, Cuenca, Teruel y Segovia (DGCN, 1998). Es una especie muy característica en la provincia de Soria, donde representa la especie principal en unas 58.000 ha, según el Mapa Forestal de España, lo que la convierte en la provincia con mayor superficie de sabina en España.

Un modelo de crecimiento tiene como función describir en el tiempo el comportamiento de una unidad de modelización, pudiendo ser ésta desde el árbol hasta el monte o región, y las relaciones establecidas entre diferentes componentes o variables. La variable más utilizada en la definición del crecimiento individual de un árbol es la variación en el diámetro normal (CALAMA, 2004).

Los modelos de crecimiento en diámetro constituyen una herramienta muy útil para gestionar las masas forestales ya que permiten predecir producciones futuras y analizar opciones selvícolas alternativas (SÁNCHEZ y MONTERO, 2004; CHOJNACKY, 1996).

El objetivo de este estudio es la elaboración de un modelo de crecimiento diametral para árbol individual independiente de la distancia que sirva para la planificación de sabinares (*Juniperus thurifera* L.) ubicados en la provincia de Soria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos empleados

Para la realización de este estudio se han utilizado 60 parcelas situadas en los montes Velasco y Valdoco (MUP nº 362 y nº 328) pertenecientes al término municipal del Burgo de Osma (Soria). Estos montes tienen una extensión de 1013 y 3316 hectáreas respectivamente, en las que se pueden encontrar tanto masas de sabinar mixtas como puras.

El diseño del experimento fue factorial, cruzado, completo, equilibrado con repeticiones y con la asignación de los tratamientos poda, clara, desbroce y laboreo) al azar. Mientras que en el primer monte se realizaron 2 repeticiones (24 parcelas) en el segundo se llevaron a cabo 3 (36 parcelas).

En el año 2000 se establecieron parcelas cuadradas de 15 x 15 m donde se tomaron los siguientes datos: densidad N (pies/ha), área basimétrica AB (m^2/ha), diámetro medio cuadrático DG (cm), % *Juniperus*, diámetro dominante D_{dom} (cm) y altura dominante H_0 (m). En el año 2005 se midieron los diámetros y se extrajeron córex en las mismas parcelas para medir el crecimiento anual del diámetro con el programa WINDENDROTM. Para la determinación de la calidad de estación se han utilizado las curvas de calidad dadas por PASCUAL (2003) en las que se establece el índice de sitio de las masas basándose en su altura dominante a los 75 años de edad.

Tras suprimir los datos, que muestran comportamientos muy particulares o sospechosos de haber sido medidos erróneamente, la base de datos para el ajuste se compone de 174 pies pertenecientes a 58 parcelas. En la *Tabla 1* se dan las características de los datos utilizados.

Procedimiento de ajuste

Las variables del modelo se han dividido en cuatro grupos, teniendo la estructura del modelo la siguiente forma (ANDREASSEN, 2002):

$$\ln(\text{crec5}) = a + b_i \cdot \text{TAMAÑO} + c_i \cdot \text{COMPETENCIA} + d_i \cdot \text{SITIO} + e_i \cdot \text{MASA}$$

siendo: $\ln(\text{crec5})$: logaritmo neperiano de una variable que expresa el incremento en diámetro del árbol en un período de 5 años.

TAMAÑO: Contiene las variables propias de la situación inicial del árbol (diámetro normal)

COMPETENCIA: Indica el estatus social entre árboles y se compara la relación de crecimiento entre ellos (tratamiento silvícola y relación entre el diámetro y el diámetro medio cuadrático)

SITIO: Contiene las variables de la calidad de estación.

MASA: Contiene las variables propias de la masa (altura dominante, diámetro dominante, diámetro medio cuadrático, densidad, área basimétrica, % juniperus).

Se ha aplicado una transformación logarítmica para linealizar la relación entre las variables dependientes e independientes y evitar la heterocedasticidad (HÖKKA *et al.*, 1997). Para corregir esta transformación, se aplicó el ratio empírico sugerido por Snowdon (SNOWDON, 1991) cuya formula es $\frac{\text{crec}_5}{\exp[\ln \overline{\text{crec}_5}]}$, siendo crec_5 la media del crecimiento observado en cinco años y $\overline{\text{crec}_5}$ la media del crecimiento estimado en cinco años.

Para expresar el crecimiento diametral del árbol individual, se han probado las siguientes variables independientes: $(D_2 - D_1)$, $(D_2^2 - D_1^2)$, $(AB_2 - AB_1)$.

El ajuste del modelo lineal se ha realizado utilizando el programa STATGRAPHICS plus 5.1. El ajuste del modelo se realizó en varias fases en las que se evaluó el efecto de diferentes grupos de variables explicativas, incluyendo primero las relacionadas con la dimensión del árbol individual, y posteriormente y de forma consecutiva las variables de competencia, sitio y masa.

La selección del modelo más adecuado se ha hecho basándose en maximizar los valores del coeficiente de correlación (R^2) y disminuir el error medio cuadrático (MSE). Las variables seleccionadas tenían que ser significativas y con un comportamiento coherente con el crecimiento en diámetro.

La evaluación del modelo se ha realizado calculando la bondad del ajuste (HYNYNEN, 1995) (Tabla 2), diferentes validaciones cruzadas de los datos y el análisis gráfico de los residuos.

La validación cruzada se ha realizado con 1 parcela, 15 parcelas y 29 parcelas. La primera consiste en ajustar el modelo sin incluir los datos de una parcela cada vez (KOZAC & KOZAC, 2003; SÁNCHEZ y MONTERO 2004; ZHANG, 1997) obteniendo de esta forma los parámetros a aplicar en la estimación de los crecimientos de los árboles incluidos en la parcela eliminada. El procedimiento de las otras dos validaciones es análogo. En todas estas validaciones se han calculado los mismos estadísticos que en los datos de ajuste.

Por último se ha analizado el comportamiento de los residuos estandarizados generados (*valor observado-valor predicho*) al aplicar el modelo en los datos de ajuste frente a las variables explicativas del mismo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras probar diferentes variables dependientes e independientes de forma iterativa, el modelo de mayor R^2 (70%) y menor MSE (0.141) es el siguiente:

$$\begin{aligned} \ln\left((D_2^2 - D_1^2) + 1\right) = & 0,163976 + 3,17469 \cdot \frac{1}{\ln D_1} + 1,51626 \cdot \ln\left(\frac{D_1}{DG}\right) + \\ & 0,00265687 \cdot DG^2 + 11,5349 \cdot \frac{1}{H_0} - 7,28788 \cdot \frac{1}{\text{calidad}} \end{aligned}$$

donde D_1 es el diámetro actual en cm, D_2 es el diámetro en cm del árbol en cinco años, DG es el diámetro medio cuadrático en cm, H_0 es la altura dominante en m y la calidad es la altura dominante de la masa en m. a la edad de 75 años.

El valor constante 1 fue añadido a cada observación antes de la transformación logarítmica para evitar valores negativos de la variable transformada en incrementos diametrales inferiores a 1 cm, conseguir una distribución normal de los residuos y reducir la heterocedasticidad de los residuos de ajuste (CALAMA, 2004).

Todos los parámetros tienen sentido biológico y son significativos al 0,05. En el modelo propuesto se observa que el crecimiento disminuye al aumentar el diámetro normal del árbol, la competencia (posición social del árbol dentro de la masa D_1/DG), y la madurez de la masa (altura dominante H_0). Por otro lado, cuando aumenta la calidad y el diámetro medio cuadrático DG aumenta el crecimiento a igualdad del resto de las variables. En la *Figura 1* se analiza la evolución del crecimiento ($D_2 - D_1$) frente al diámetro inicial D_1 en diferentes escenarios con: cuatro calidades de sitio (4.8; 6.3; 7.4 y 9.5 m.), dos alturas dominantes (5 y 9 m.) y tres diámetros medios cuadráticos (15; 20 y 25 cm.).

Destaca la aparente contradicción de la relación directa del crecimiento con el diámetro medio cuadrático y con el diámetro normal del árbol. Los datos utilizados para el ajuste del modelo pertenecen a masas que en su mayoría aún no han llegado a su máximo crecimiento corriente, ya que la sabina presenta un crecimiento en diámetro lento y sostenido durante un largo periodo de tiempo (MEEUWIG & COOPER, 1981), lo que justifica que los diámetros mayores tengan un crecimiento más alto que los más pequeños. Esto se puede observar en la *Figura 2*, donde los crecimientos reales frente al diámetro inicial presentan una tendencia creciente hasta los 35 cm. aproximadamente. Tan solo se disponen de 5 árboles de dimensiones superiores a esta cifra, por lo que la aplicación del modelo obtenido se restringe al intervalo 15-35 cm de diámetro y más de 10 cm de diámetro medio cuadrático, puesto que las parcelas utilizadas para la construcción del modelo se reparte entre tales límites. Por otra parte, un diámetro medio cuadrático alto indica, además de una masa evolucionada, una menor competencia al ser masas más abiertas.

El ratio empírico calculado para corregir la transformación logarítmica resultó ser 1,07261508.

En la *Tabla 3* se presentan los resultados de los estadísticos para los datos de ajuste y las diferentes validaciones una vez eliminada la transformación logarítmica y utilizando como variable independiente $(D_2^2 - D_1^2)$. En el caso de la evaluación con los datos de ajuste, la media de los residuos standard es de 0,147, siendo no significativo con una probabilidad del 0.05, y la de los residuos standard relativo 14.2%, lo cual nos indica que el modelo es insesgado y preciso. Los estadísticos de los datos de validación de 1, 15 y 29 parcelas son muy parecidos a los de los datos de ajuste.

Los residuos en función de las variables explicativas se representan en *Figura 3*. En los gráficos *a*, *b* y *c* se puede apreciar que existe un aumento de la varianza al crecer la variable independiente. Este comportamiento probablemente sea debido al menor número de datos en

esas clases diamétricas, puesto que en el gráfico *a* existen muy pocos datos a partir de la clase 35 (un dato para la clase 45, dos datos para la clase 40 y cuatro datos de 35). Por su parte, en el gráfico *b* ocurre algo análogo, ya que se tiene únicamente un dato para la clase 55 y 3 datos para la clase 45. Por esta misma razón, la desviación standard de los residuos aumenta al incrementarse los diámetros iniciales y los valores predichos. Observando el resto de los gráficos no se aprecian comportamientos anómalos del sesgo respecto a las variables explicativas.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Junta de Castilla y León a través del Departamento de Investigación y Experiencias Forestales de Valonsadero.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDREASSEN, K.; 2003. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. *Forest Ecology and Management* 180 (2003): 11-24.
- CALAMA SAINZ, R.A.; 2004. Modelo interregional de selvicultura para *Pinus pinea* L. Aproximación mediante funciones con componentes aleatorios. Tesis doctoral, E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, 307p (inédito).
- CEBALLOS, L. & RUIZ DE LA TORRE J.; 1979. *Árboles y arbustos*. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- CHOJNACKY, D.C.; 1997. Modeling diameter growth for pinyon and juniper trees in dryland forest. *Forest Ecology and Management* 93: 21-31.
- COMÍN SEBASTIÁN. P. 1985. Descripción estructural de las poblaciones de sabina albar (*Juniperus thurifera*, L.) en el cuadrante sud-occidental de la provincia de Teruel: Análisis de la competencia interespecífica entre la sabina y otras especies arbóreas. Trabajo de investigación. Departamento de Ecología. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.
- DGCN; 1998. *II Inventario Forestal Nacional (1986-1996)*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- HÖKKÄ, H.; ALENIUS, V. & PENTTILÄ, T.; 1997. Individual-tree basal area growth models for scots pine, pubescens birch and norway spruce on drained peatlands in Finland, *Silva Fennica* 31 (2): 161-178.
- HYNYNEN, J.; 1995. Predicting the growth response to thinning for Scots Pine stands using individual-tree growth models. *Silva Fennica* 29 (3): 225-246.
- KOZAC, A. & KOZAC, R.; 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models?. *Canadian Journal of Forestry* 33: 976-987
- MEEUWIG, R.O. & COOPER, S.V. (1981). Site quality and growth of pinyon-juniper stands in Nevada. *For. Sci.* 27 (3): 593-601.
- PASCUAL ALCON, H.; 2003. Índice de sitio para *Juniperus thurifera* L. en Castilla y León. Proyecto fin de carrera. Universidad de Valladolid. Escuela Universitaria de Ingenierías Agrarias de Soria.
- SÁNCHEZ GONZÁLEZ, M. & MONTERO GONZÁLEZ, G.; 2004. Modelo de incremento en diámetro para *Quercus suber* L en el parque natural de los alcornocales. *Cuadernos de. La Sociedad Española de Ciencias. Forestales* 18: 205-209.
- SNOWDON, P.; 1991. A ratio estimator for bias correction in logarithmic regressions, *Canadian Journal of Forest Research*. 21: 720-724.
- ZHANG, L.; 1997. Cross-validation of non-linear growth functions for modelling tree height-diameter relationships. *Annals of Botany* 79: 251-257.

FIGURAS Y TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los datos.

	Crec. (mm)	D₁ (cm)	D₂ (cm)	Calidad (m)	N (pies/ha)	DG (cm)	H₀ (m)	AB (m²/ha)
Media	4.246	17.96	18.39	8.14	603.3	19.57	8.20	17.745
S.D.	1.887	8.896	8.919	1.236	187.128	2.72	1.211	4.691

Crec.=crecimiento diametral en 5 años; D₁= diámetro inicial; D₂= diámetro final; Calidad = altura dominante de la masa a los 75 años; N = densidad; DG = diámetro medio cuadrático; H₀ = altura dominante; AB = área basimétrica.
S.D.= Desviación standard.

Tabla 2. Criterios utilizados para la evaluación estadística del modelo.

Estadísticos	Símbolo	Fórmula	Ideal
Sesgo absoluto	<i>Sesgo</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{obs_i - est_i}{n}$	0
Sesgo relativo	<i>rSesgo</i>	$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{obs_i - est_i}{est_i} \right)}{n}$	0
Raíz del error cuadrático medio	<i>RMSE</i>	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - est_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$	0
Raíz del error cuadrático medio relativo	<i>rRMSE</i>	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{obs_i - est_i}{est_i} \right]^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$	0
Eficiencia del modelo	<i>Mef</i>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (est_i - obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}$	1

est_i: valor estimado i-ésimo; *obs_i*: valor observado i-ésimo; *n*: número de observaciones.

Tabla 3. Resultados de los estadísticos aplicados a los datos de ajuste y a los datos de validación una vez eliminada la transformación logarítmica y utilizando como variable independiente $(D_2^2 - D_1^2)$.

Estadísticos	Datos de ajuste	Validación		
		1 parcela	15 parcelas	29 parcelas
Sesgo	0.147	0.151	0.030	0.129
rSesgo	0.142	0.147	0.133	0.140
RMSE	7.289	7.565	7.0003	7.264
rRMSE	0.447	0.474	0.426	0.441
Mef	0.581	0.549	0.614	0.584

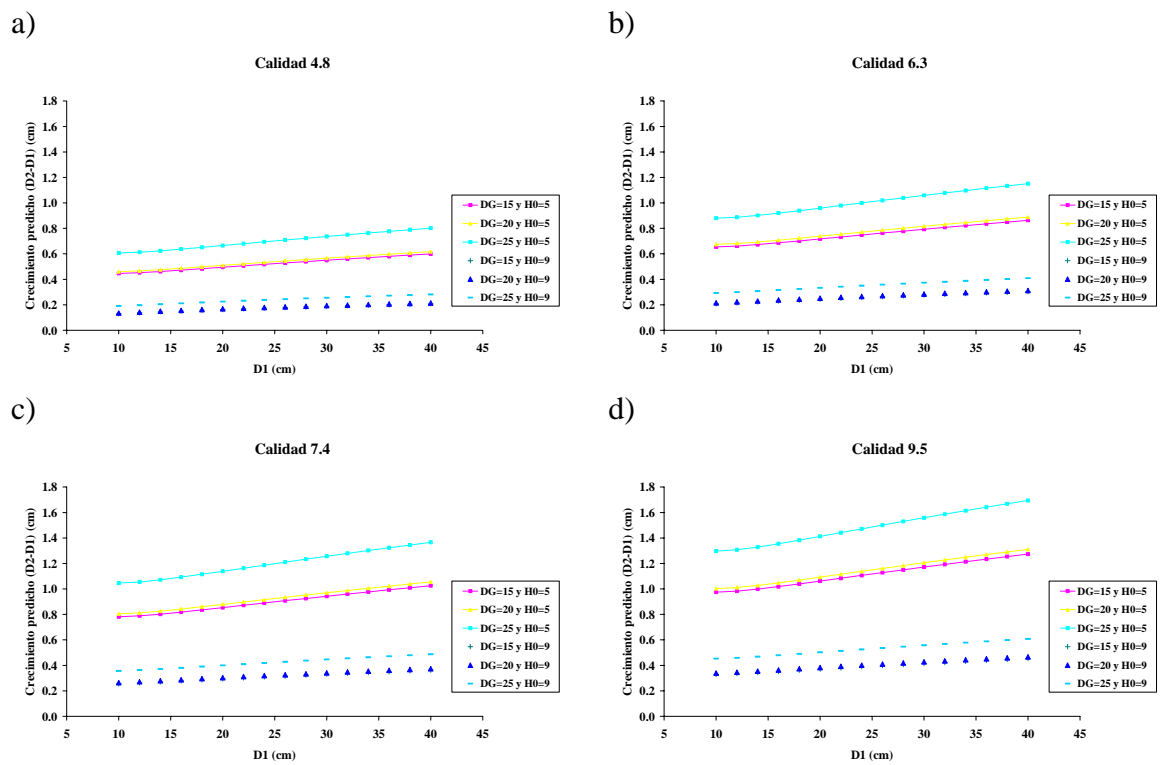


Figura 1. Simulaciones de diferentes valores de las variables explicativas.

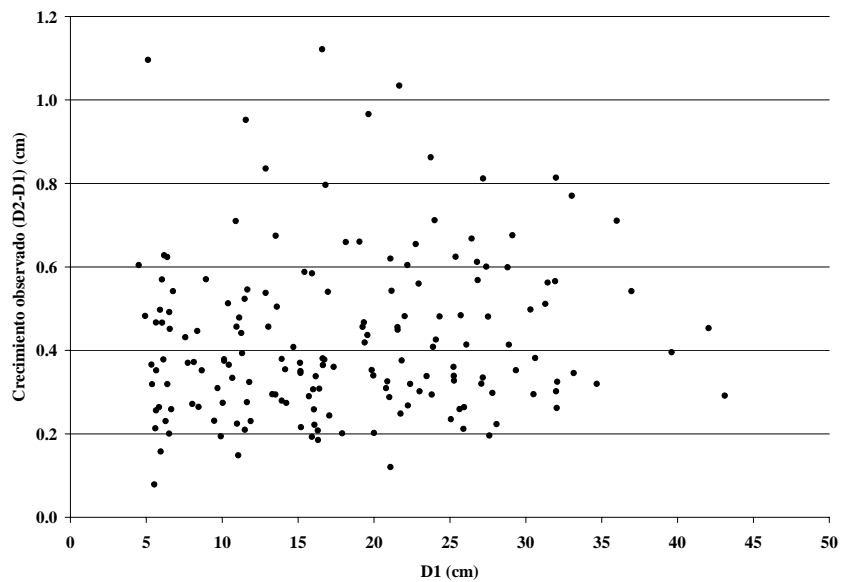


Figura 2. Valores observados del crecimiento (D2-D1) frente al diámetro inicial D1.

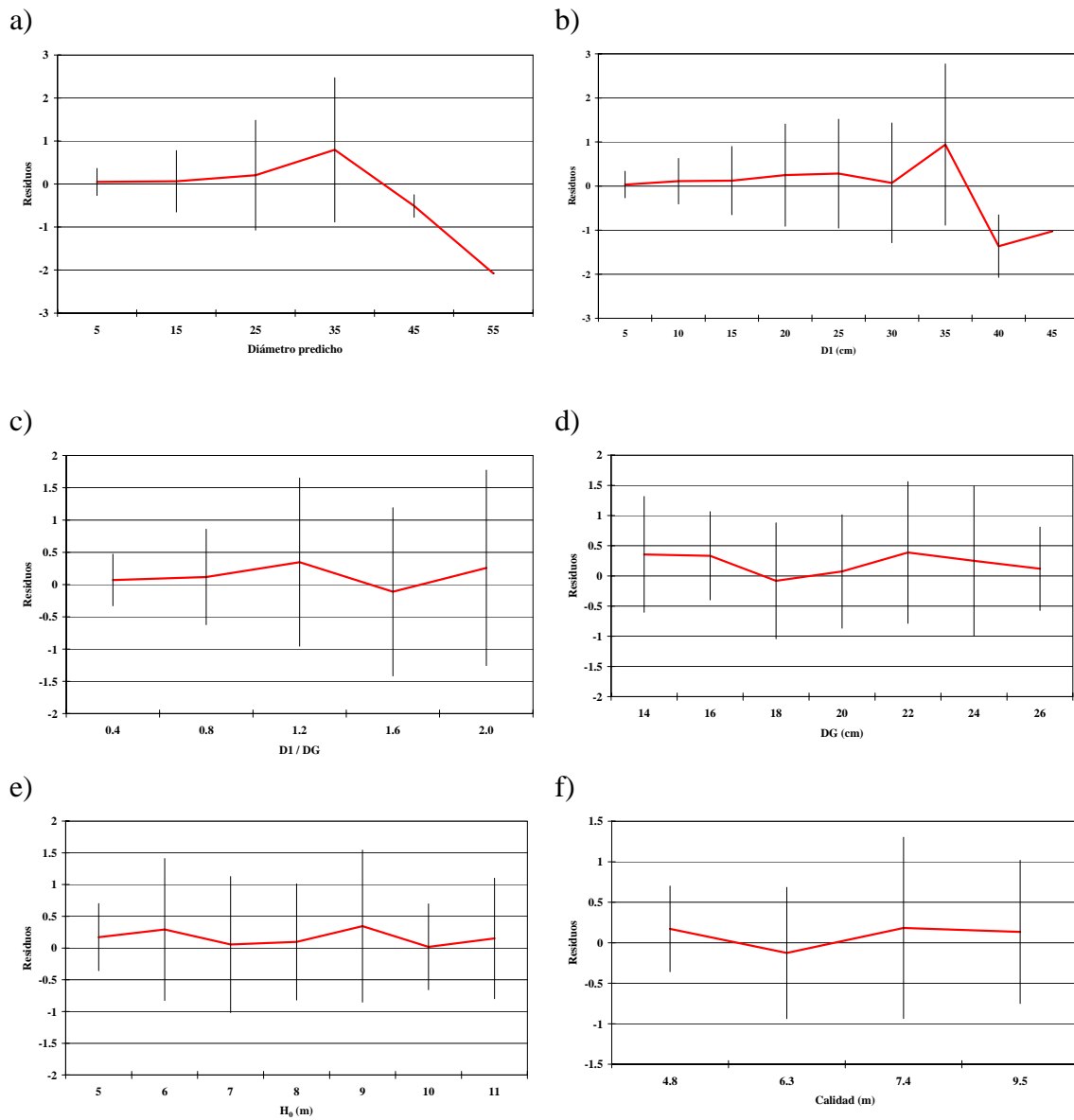


Figura 3. Residuos gráficos del modelo de crecimiento en diámetro frente al diámetro predicho (a), diámetro inicial D_1 (b), relación entre el diámetro inicial y diámetro medio cuadrático $\frac{D_1}{DG}$ (c), diámetro medio cuadrático DG (d), altura dominante H_0 (e) y la calidad (f).