



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Ecuaciones simples de altura y volumen para plantaciones de chopo (*Populus x euroamericana*) para el empoderamiento de los propietarios forestales en la cuenca del Duero

BLANCO, ROBERTO¹, BLANCO, JUAN A.¹

¹ Departamento de Ciencias, Institute for Multidisciplinary Research in Applied Biology (IMAB), Universidad Pública de Navarra.

Resumen

Las plantaciones de chopo son una opción atractiva para muchos agricultores de la ribera del río Duero, ya que el despoblamiento y envejecimiento rural impiden plantar cultivos que demanden mano de obra. Sin embargo, muchos de estos propietarios forestales son de edad avanzada y carecen de formación selvícola específica, por lo que se ven obligados a aceptar las estimaciones de las existencias de madera que las propias empresas madereras ofrecen en el momento de la compra. Para proporcionar una herramienta simple, pero empoderadora, se desarrollaron ecuaciones para estimar el crecimiento en altura y volumen. Se midió el diámetro y la altura de 404 chopos durante 10 años (2009-2019) en tres parcelas de la provincia de León. Se estimó un crecimiento anual de 1,66 cm/año en diámetro, 1,52 m/año en altura y 0.03 m³/año en volumen, o 13.02 m³/ha/año. El crecimiento máximo se alcanzó a los 13-15 años (rango típico en las plantaciones de la región). Dichos datos permitieron generar ecuaciones lineales y exponenciales simples que estimaron del 84% al 97% de la variabilidad observada. Dichas ecuaciones pueden ser fácilmente utilizadas en cualquier teléfono móvil con calculadora, permitiendo a los propietarios forestales estimar sus existencias simplemente con el uso de una cinta métrica para medir el perímetro.

Palabras clave

Plantaciones forestales, ecuaciones de crecimiento, duración de turno, productividad de choperas, empoderamiento forestal.

1. Introducción

La creciente demanda de madera y papel para la industria está generando una expansión de las plantaciones de árboles de crecimiento rápido en todo el mundo, especialmente en el suroeste de Europa (Rueda y García Caballero 2018). Estas plantaciones de ciclo corto aportan alrededor del 33% del volumen de madera utilizado en la industria, suponiendo el 7% de la superficie mundial destinada a plantaciones forestales (Freer Smith *et al.* 2019). Entre las diversas especies utilizadas, el chopo (*Populus* spp.) ha experimentado un importante crecimiento tanto por su destino en la industria del tablero contrachapado y la fabricación de tableros de partículas o para usos energéticos (Chopo en Castilla y León 2021). Estas plantaciones de chopos generalmente se ubican en tierras agrícolas o en antiguas zonas boscosas poco degradadas (Christersson 2006).

Las plantaciones de chopo presentes en España suelen utilizar un único clon, siendo el *Populus x euramericana* (Dode) Guinier clon I-214 (*P. deltoides* Marsh. ♀ x *P. nigra* L. ♂) el más común en la cuenca del Duero, suponiendo más del 70% de los árboles, aunque también se emplean otros híbridos (Fernández-Manso y Hernanz-Arroyo 2004). En esta región el manejo de las plantaciones se realiza en turnos de unos 15 años. Son plantaciones que requieren de pocas labores, centrándose éstas en los primeros años y en los momentos de realizar las podas, y limitándose después a riegos de apoyo en épocas muy secas y al control de hierba o plagas. Las plantaciones de chopos permiten que los agricultores tengan ingresos extra de zonas de poca utilidad para otros usos agrícolas, o

permiten que propietarios que no trabajan el campo obtengan ingresos de sus tierras (Ambrosio-Torrijos *et al.* 2003). Por todo ello, muchos propietarios tanto públicos como privados están plantando choperas como una forma de mantener las zonas productivas sin tener que invertir mucho tiempo en su explotación. Pero esto conlleva un nuevo reto a los propietarios: la estimación de su producción de madera. Debido a la falta de un conocimiento formal sobre dasometría muchos propietarios desconocen cuanta madera produce su plantación o como estimarla. Por ello deben aceptar los precios ofrecidos por las empresas que se los compren, estando el mercado en el caso de la cuenca del Duero dominado por una única compañía internacional, produciéndose un desequilibrio en las negociaciones que beneficia a las compañías frente a los propietarios (Vainio & Paloniemi 2012).

Una manera sencilla de empoderar a los propietarios silvícolas es proporcionar herramientas que les permitan estimar sus producciones. Aunque a lo largo del tiempo se han desarrollado diversas ecuaciones volumétricas (Bravo *et al.* 1996, Rodríguez y Molina 2003, Barrio-Anta *et al.* 2007, Rodríguez *et al.* 2010, Hjelm 2013, Fraga *et al.* 2018), éstas se han desarrollado desde un punto de vista científico o para el silvicultor profesional, empleando combinaciones de múltiples factores (como diámetro del árbol, altura del árbol, densidad de plantación, clima, etc.) para estimar el volumen de manera más exacta. Estas ecuaciones emplean métodos estadísticos que pueden ser complejos (Barrio-Anta *et al.* 2007, Hjelm 2013), por lo que no resultan prácticas para los propietarios forestales, particularmente en esta región, donde la media de edad es de 60 años (INE 2021) y poseen un bajo nivel educativo (Carreras y Tafunell 2005). Por eso, si a los propietarios se les facilitan ecuaciones sencillas para estimar el volumen que utilicen una variable fácil de medir, como el diámetro, podrán estimar el volumen de producción de sus explotaciones. Además, si también conocen la altura de los árboles, podrán negociar en mejores condiciones, ya que la altura es un factor a tener en cuenta al determinar cuántos cortes se realizarán al árbol para su transporte desde la explotación a la serrería.

Trabajos previos en plantaciones de chopos han demostrado que la simplificación en los modelos de estimación de productividad (Rodríguez *et al.* 2019) o ecuaciones de volumen alternativas (Marziliano *et al.* 2018) no reducen la exactitud del cálculo. Por tanto, nuestra hipótesis inicial es que ecuaciones simples basadas en el diámetro con un alto grado de exactitud pueden desarrollarse para las plantaciones de chopo. Para comprobar dicha hipótesis, primero seleccionamos varias parcelas en la ribera media del río Órbigo (León), y luego se comprobaron las características edafológicas de las parcelas para asegurarnos que cubríamos el rango típico presente en la zona. Los árboles plantados se controlaron durante 10 años (2009-2019), midiendo su diámetro y altura anualmente.

2. Objetivos

Nuestro objetivo principal fue desarrollar una ecuación simple para estimar el volumen para cualquier año a lo largo de la rotación. Además, como objetivo secundario, desarrollamos una ecuación simple para estimar la altura en condiciones similares a la ecuación para el volumen.

3. Metodología

La Península Ibérica está rodeada de cordilleras costeras con una meseta interior que crea un clima mediterráneo continental. La zona noroeste está dominada por la cuenca del Duero, de la que el río Órbigo es tributario en segundo orden. En esta región se ubican las tres parcelas utilizadas para el estudio, localizadas en el municipio de Villarejo de Órbigo (provincia de León, 42° 26' 46" N, 5° 54' 15" W), y situadas a 820 metros sobre el nivel del mar. El clima es templado con veranos secos (Csb en la clasificación de Köpper-Geiger (Köppen & Geiger 1936)). La temperatura media anual es de 11.2 °C siendo julio el mes más cálido (con una media de 19.9 °C) y enero el más frío (3.2 °C). La precipitación media es de 562 mm, con noviembre como el mes más lluvioso (74 mm) y julio el más seco (23 mm) (AEMET 2020). Este clima hace que en los meses de julio y agosto se produzca un

déficit de precipitación (Gaussen & Bagnouls 1953) con un índice de aridez de 0.5 – 0.75 (P/ETP, (Cherlet et al. 2018)). Los vientos dominantes son de sur y oeste (con una frecuencia del 45%) y moderada velocidad (3 – 4 m/s). Las parcelas son planas y están emplazadas en terreno agrícola. Los suelos son fluvisoles cálcicos (clasificación FAO), ubicados en la llanura de inundación del río Órbigo, a una distancia de entre 3 y 5 km de la ribera del río, y poseen una textura franco-arcillosa. El pH es neutro (7.2 – 7.3) con un contenido moderado de materia orgánica en la capa alta (1.5% - 1.8%) y con alta concentración de calcio (0.20% - 0.53%) (ITACYL 2021).

Las parcelas seleccionadas tuvieron el manejo típico en la región hasta el año 2005. La parcela 1 se había dedicado al cultivo del chopo previamente, la parcela 2 había tenido pasto autóctono durante varios años y en la parcela 3 se había cultivado una rotación de cereal y trébol durante varios años. Estas tierras son representativas de extensas áreas en la llanura aluvial de la cuenca del río Órbigo. Al final del otoño de 2005 las parcelas fueron aradas y en marzo de 2006 se plantaron arbolillos de 2 años de *Populus x euroamericana*, clon I-214, en las parcelas 1 y 2. La parcela 3 se plantó en diciembre de ese mismo año. En total se plantaron 430 árboles en hoyos de 1.2 – 1.4 m de profundidad con un marco de 5 x 5 metros. El manejo de los árboles fue el tradicional en la región: abonado localizado NPK 12-24-12 (0.3 kg/árbol) en el momento de la plantación y en agosto de 2008, control químico de hierbas en la plantación y siega manual en verano en años posteriores. Se realizaron 2 riegos cada año uno en junio y otro en agosto. Los árboles se podaron en otoño de 2008 y en otoño de 2011. Debido a diversos factores (rotura por viento, crecimiento inadecuado, etc) en 2019 se conservaban 404 árboles. Una descripción más detallada de las parcelas y los análisis puede encontrarse en Blanco (2020).

Cada año en agosto se realizaron 2 mediciones perpendiculares a la altura del pecho (1.3 m, DBH) para cada árbol utilizando una forcípula y tomando como dato la media. La altura (h) se tomó como la media de 6 mediciones realizadas para cada árbol en agosto de cada año utilizando un hipsómetro ultrasónico (Vertex IV, Haglöl, Suecia). El índice de esbeltez se calculó como la media de h/DBH. El cálculo del volumen se estimó utilizando el promedio del conjunto de las 5 ecuaciones de volumen más ajustadas para las poblaciones de chopos en la ribera del río Órbigo (Christersson 2006, Rueda et al. 2006, Rueda y García Caballero 2013, Rueda y García Caballero 2018).

Para tener en cuenta las posibles diferencias de crecimiento por el efecto de la fertilidad del suelo en agosto de 2019 se tomaron 12 muestras distribuidas homogéneamente de los primeros 10 cm del suelo en cada parcela. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron con un tamiz de 2 mm antes de su envío para su análisis químico en el CEBAS-CSIC (Murcia, España). La conductividad y salinidad se midieron mediante disolución en agua a 1:2.5 (10 g de suelo en 25 ml de agua destilada). Las mediciones se realizaron con un pHmetro Micro pH-2001 y un conductímetro Micro-CM-2202 (ambos de Crison, Barcelona, España).

Se comprobó la normalidad de los datos de altura y diámetro mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov. La homocedasticidad de los datos se comprobó con las pruebas de Levene y Bartlett. Dado que los datos superaron ambas pruebas, las diferencias entre parcelas para el diámetro, la altura, el volumen y la composición química del suelo se determinaron con una ANOVA de una vía (Quinn & Keough 2002). Los árboles con un DBH ≥ 10 cm se analizaron mediante regresión de mínimos cuadrados entre datos no transformados para DBH y volumen, y para DBH y altura se emplearon funciones lineales, cuadráticas y de potencia. También se probaron otras funciones (cúbicas, logarítmicas, etc.) pero dada su mayor complejidad y la falta de mejores estimaciones que los modelos seleccionados los resultados no se han reflejado. Como el número de árboles de cada parcela era diferente, para conseguir un equilibrio en los datos, se crearon subconjuntos de datos para cada parcela con el mismo número de árboles partiendo de los datos originales, eligiendo los árboles de manera aleatoria y estratificando la selección según el diámetro para asegurar que todos los rangos de DBH estaban correctamente representados en los modelos. Después se unieron los

datos de las tres parcelas y la base de datos resultante fue aleatoriamente distribuida en dos grupos, uno para el diseño del modelo y parametrización (con el 80 % de los árboles) y otro para evaluar el rendimiento del modelo (Bennett et al. 2013, Schuwirth et al. 2019).

Las predicciones del modelo se evaluaron con el conjunto de datos de validación comparando las estimaciones de volumen y altura generadas con las diferentes ecuaciones basadas en DBH con los valores observados registrados a diferentes edades para los árboles en el conjunto de datos de validación. El rendimiento del modelo se analizó utilizando índices de bondad de ajuste (coeficiente de determinación R^2 , coeficiente de diferencia de Theil U (Ecuación (1)) (Theil 1966), la eficiencia de modelización ME (Ecuación (2)) (Vancly & Skovsgaard 1997), el sesgo medio (Ecuación (3)), la diferencia media absoluta (MAD, Ecuación (4)) y la raíz cuadrada del error medio (RMSE, Ecuación (5)).

$$U = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)}{\sum O_i^2}}$$

$$ME = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{P})^2}$$

$$\text{Sesgo medio} = \frac{\sum (O_i - P_i)}{n}$$

$$\text{Diferencia media absoluta} = \frac{\sum |O_i - P_i|}{n}$$

$$\text{Raíz cuadrada del error medio} = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}}$$

Donde O_i representa la observación individual i , P_i es la predicción correspondiente al modelo para la observación i , \bar{P} es la media de las predicciones y n es el número de observaciones.

4. Resultados

El diámetro de los árboles en 2019 no mostró diferencias significativas entre parcelas ($F_{2,401} = 2.050$, $p = 0.130$). A los 13 años en la plantación se midieron diámetros desde los 12.8 a los 39.1 cm, con la mayoría de los árboles cerca del diámetro medio de 25 cm (Tabla 1). Sí hubo diferencias significativas en las alturas de los árboles en las diferentes parcelas ($F_{2,401} = 53.684$, $p < 0.001$), siendo los árboles de la parcela 1 significativamente más altos que los de la parcela 2, y estos mayores que los de la parcela 3 (Tabla 1). La altura varió desde los 11.93 a los 37.17 m con una media de 22 m. La misma pauta se encontró en el índice de esbeltez, presentando los árboles de la parcela 1 más esbeltez que los de la parcela 2 y éstos más que los de la parcela 3 parcelas ($F_{2,401} = 65.235$, $p < 0.001$, Tabla 1). En todas las parcelas los árboles fueron bastante esbeltos, presentado índices cercanos a 100. El volumen de cada árbol fue muy variable (de 0.038 a 1.343 m³) con una media de 0.458 m³ (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de las medidas de los árboles en agosto de 2019 (media \pm desviación estándar). Diferentes letras indican diferencias entre las parcelas. HSD de Tukey para $\alpha = 0.05$.

Variable	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Todas las parcelas
Número de árboles	51	79	274	404
DBH (cm)	24.64 \pm 7.05a	25.70 \pm 5.49a	24.55 \pm 3.48a	24.78 \pm 4.52

Altura (m)	25.20 ± 5.48a	22.68 ± 3.30b	20.72 ± 2.13c	21.67 ± 3.36
Índice de esbeltez (m/m)	105.2 ± 16.6a	89.9 ± 10.8b	85.4 ± 10.3c	88.8 ± 13.1
Volumen del árbol (m³)	0.492 ± 0.386a	0.457 ± 0.271a	0.356 ± 0.149b	0.393 ± 0.226
Área basal del árbol (m²)	0.051 ± 0.029a	0.054 ± 0.023a	0.048 ± 0.014a	0.050 ± 0.018

Cuando se considera el conjunto de las parcelas, el incremento anual medio de los árboles en diámetro fue de 1.66 cm, en altura 1.52 m y en volumen 0.03 m³, lo que equivaldría a un incremento medio anual de 13.02 m³/ha · año. Las parcelas 1 y 2 alcanzaron el incremento máximo anual de diámetro, altura y volumen en los años 9 y 11 (respectivamente), mientras que la parcela 3 alcanzó el máximo incremento anual de diámetro y altura antes que el incremento anual del volumen (en los años 6, 9 y 15 respectivamente) (Tabla 2).

Tabla 2. Valores máximos de incremento anual en las variables dimensionales (media ± desviación estándar). Los valores entre paréntesis indican el año de plantación (edad del árbol – 2 años) en que se alcanzó el máximo.

Variable	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Todas las parcelas
Incremento DBH anual (cm año ⁻¹)	2.33 ± 0.86 (9)	2.16 ± 0.71 (7)	2.90 ± 0.83 (4)	2.39 ± 0.60 (8)
Incremento anual de altura (m año ⁻¹)	2.22 ± 0.93 (9)	2.10 ± 0.84 (9)	1.80 ± 0.50 (7)	1.82 ± 0.60 (9)
Incremento anual de volumen (m³ año ⁻¹)	0.077 ± 0.064 (8)	0.067 ± 0.034 (9)	0.092 ± 0.050 (13)	0.081 ± 0.040 (13)

El máximo incremento de volumen anual se registró en las parcelas significativamente más fértiles (Tabla 3). El suelo en la parcela 3 mostró valores más bajos de materia orgánica, carbono y nitrógeno, así como de todos los macronutrientes, y un valor alto de C/N. También registró un pH más alto que la parcela 2 y significativamente mayor conductividad que la parcela 1 (Tabla 3).

Las estimaciones del volumen del tronco basadas en el DBH mostraron que el modelo tiene una alta precisión, puesto que todas las ecuaciones alcanzaron coeficientes de determinación (R^2_{adj}) superiores al 0.94, siendo todos los parámetros significativos (Tabla 4). El modelo lineal subestimó los valores para los árboles más pequeños y los más grandes, mientras que el modelo potencial sobreestimó el volumen de los árboles más altos. Por otra parte, el modelo cuadrático mostró un balance en las predicciones en todos los rangos (Figura 1). Sin embargo, la gran dispersión en los valores de altura de los árboles se traduce en coeficientes de determinación más bajos que en los modelos para el volumen (0.75 – 0.76, Tabla 4), aunque todos los parámetros fueron significativos, excepto la pendiente en el modelo cuadrático. No se observaron diferencias entre el comportamiento de las ecuaciones, estando los errores en la estimación de altura de los árboles más altos en el rango 15 – 25 cm de DBH.

Tabla 3. Análisis químico del suelo en agosto de 2019 (media ± desviación estándar). Diferentes letras indican diferencias entre las parcelas. HSD de Tukey para $\alpha = 0.05$.

Variable	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
pH del suelo	7.346 ± 0.286ab	7.210 ± 0.164a	7.515 ± 0.212a
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	66.400 ± 10.51b	97.900 ± 31.3804a	94.775 ± 14.076a
Materia orgánica (%)	6.880 ± 0.850a	7.180 ± 0.537a	3.130 ± 0.450b
Carbono total (%)	4.270 ± 0.425a	4.530 ± 0.453a	1.970 ± 0.242b
Carbono orgánico (%)	3.990 ± 0.492a	4.160 ± 0.311a	1.820 ± 0.277b
CaCO ₃ (%)	2.290 ± 2.549a	3.050 ± 3.253a	1.270 ± 1.663a
N (%)	0.400 ± 0.045a	0.430 ± 0.057a	0.170 ± 0.035b
P (%)	0.056 ± 0.009a	0.046 ± 0.012a	0.027 ± 0.007b
C/N	10.656 ± 0.242a	10.561 ± 0.486a	11.367 ± 0.694b

Como se ha descrito anteriormente, la validación se realizó creando series aleatorias de 10 – 11 árboles para cada parcela. Los atributos de dichos árboles fueron muy similares al conjunto de datos, manteniendo las mismas diferencias entre parcelas observadas en el conjunto (Tabla 5). Lo que indicaba que los datos de validación eran una buena representación del conjunto.

Tabla 4. Valor de los parámetros, su significancia y el error estándar de las ecuaciones probadas. Para volumen, lineal: $V(m^3) = Y_0 + A \cdot DBH(cm)$; cuadrática: $V(m^3) = Y_0 + A \cdot DBH + B \cdot DBH^2(cm)$; potencia: $V(m^3) = A \cdot DBH^B(cm)$. Para altura, lineal: $H(m) = Y_0 + A \cdot DBH(cm)$; cuadrática: $H(m) = Y_0 + A \cdot DBH + B \cdot DBH^2(cm)$; potencia: $H(m) = A \cdot DBH^B(cm)$. Niveles de significancia*: significancia con $p > 0.05$; **: significancia con $p < 0.001$ para $\alpha = 0.05$.

Ecuación	Y ₀	A	B	R ² _{adj}	SE _{estimada}
Volumen					
Lineal	-0.5038 ** ± 0.0071	0.0379 ** ± 0.0003	-	0.9418	0.0577
Cuadrática	-0.0308 * ± 0.0013	-0.0088 ** ± 0.0013	0.0011 ** ± 2.9·10 ⁻⁵	0.9782	0.0353
Potencia	-	0.000056 ** ± 3.7·10 ⁻⁶	2.7473 ** ± 0.0196	0.9709	0.0408
Altura					
Lineal	5.0331 ** ± 0.2994	0.6935 ** ± 0.0143	-	0.7521	2.4357
Cuadrática	0.4433 ± 0.9425	1.1472 ** ± 0.0896	-0.0102 ** ± 0.0020	0.7600	2.3966
Potencia	-	2.1061 ** ± 0.0982	0.7356 ** ± 0.0151	0.7575	2.4062

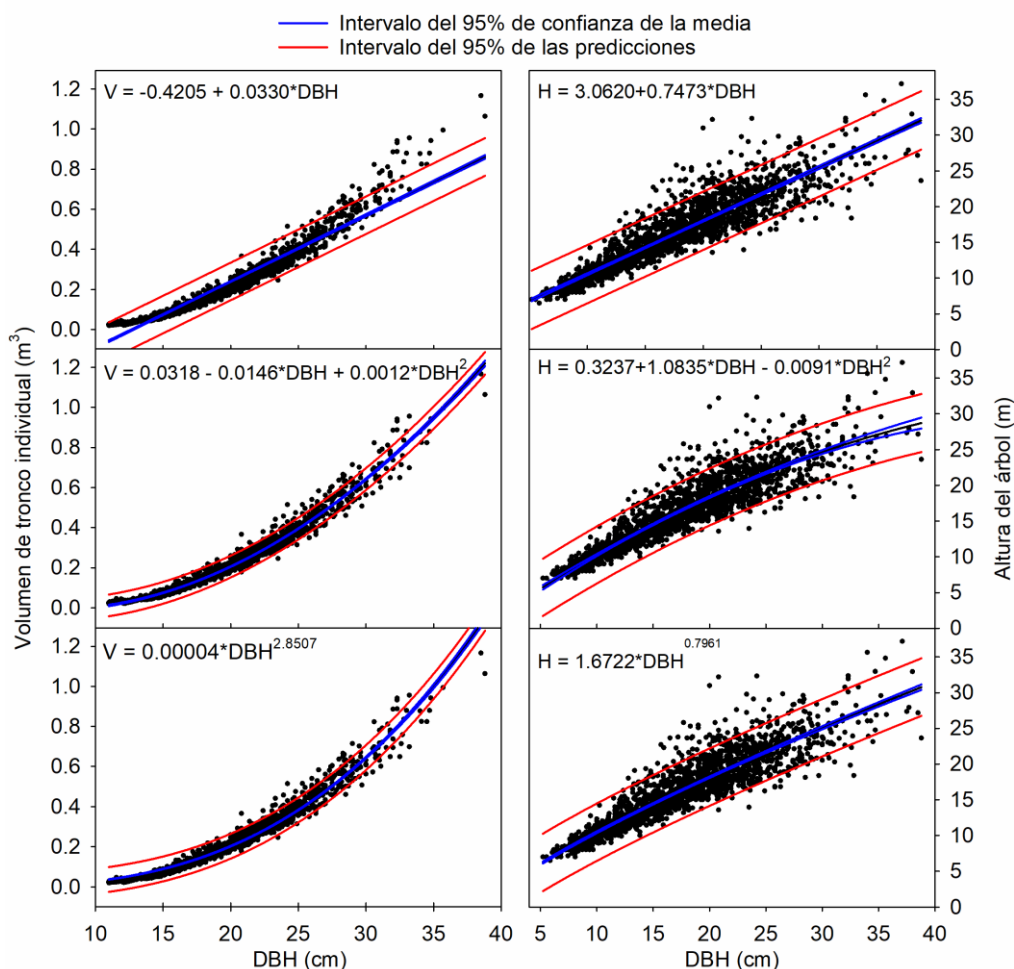


Figura 1. Estimación del volumen de los árboles (izquierda) y su altura (derecha) para tres ecuaciones (mostradas en cada panel) utilizando únicamente el DBH como variable. Los puntos indican los valores medidos.

La ecuación potencial para el volumen presentó el sesgo medio más bajo del modelo, mientras que la media de la diferencia absoluta y el RMSE más bajos se dieron en la ecuación cuadrática. Esta ecuación también mostró un bajo coeficiente U y un alto coeficiente ME, seguido de cerca por el

modelo potencial y después por la ecuación lineal. El valor de RMSE fue muy pequeño, variando entre 0.034 m³ en la ecuación cuadrática y los 0.056 m³ para la ecuación lineal.

Tabla 5. Datos del conjunto de los árboles para la validación en agosto de 2019 (media \pm desviación estándar). Diferentes letras indican diferencias entre las parcelas. HSD de Tukey para $\alpha = 0.05$.

Variable	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Todas las parcelas
Número de árboles	10	10	11	31
DBH (cm)	24.93 \pm 7.543a	24.30 \pm 3.41a	24.37 \pm 3.61a	24.83 \pm 4.98
Altura (m)	25.25 \pm 5.54a	21.58 \pm 4.02b	20.26 \pm 2.16c	22.01 \pm 4.29
Índice de esbeltez (m/m)	104.1 \pm 16.9a	92.3 \pm 7.5b	87.6 \pm 8.2c	93.4 \pm 13.3
Volumen del árbol (m ³)	0.519 \pm 0.405a	0.454 \pm 0.145a	0.337 \pm 0.139b	0.395 \pm 0.257
Área basal del árbol (m ²)	0.053 \pm 0.031a	0.053 \pm 0.011a	0.044 \pm 0.013a	0.046 \pm 0.020

Las tres ecuaciones de altura presentaron un sesgo medio bajo (menor a un centímetro), indicación de que el modelo puede representar la dispersión de los datos adecuadamente. Por otra parte, la diferencia absoluta media (de 2.05 m en todas las ecuaciones) y el valor de RMSE (unos 2.53 m e todos los modelos) era notablemente mayor y similar entre los modelos, indicación de que el modelo fue capaz de recoger la variabilidad de las alturas observadas. De manera similar, los valores tanto del coeficiente de Theil como de la eficiencia de modelización fueron moderados (Tabla 6).

Tabla 6. Indicadores de rendimiento al comparar árboles simulados y medidos en el conjunto de validación. MAD: Diferencia media absoluta; RMSE: raíz cuadrada del error medio; U: coeficiente de Theil; ME: eficiencia de modelado.

Ecuación	Sesgo medio	MAD	RMSE	U	ME
Volumen (m³/árbol)					
Lineal	0.032	0.041	0.056	0.287	0.918
Cuadrática	0.067	0.026	0.034	0.176	0.969
Potencia	0.011	0.029	0.037	0.188	0.965
Altura (m)					
Lineal	-0.003	2.058	2.547	0.555	0.691
Cuadrática	0.002	2.046	2.531	0.552	0.965
Potencia	0.000	2.053	2.534	0.553	0.694

Por lo tanto, no sorprende que las diferencias entre los modelos propuestos se reflejaran al estimar los valores para algunos DBH estándar (Tabla 7). Todos los modelos presentaron mejor precisión para los árboles más altos que para los pequeños. Los valores estimados para los tamaños típicos de tala (DBH > 30 cm o mayor) mostraron intervalos de predicción relativamente estrechos, en particular para la ecuación cuadrática. Sin embargo, los intervalos de predicción para la altura de los árboles fueron mayores, mostrando diferencias de hasta 10 m entre los límites del intervalo más bajo y el más alto (Tabla 7).

Tabla 7. Volumen y altura de los árboles para intervalos de predicción al 95% de probabilidad para valores de DBH seleccionados.

DBH (cm)		Volumen (m ³ / árbol)			Altura (m)	
	Lineal	Cuadrática	Potencia	Lineal	Cuadrática	Potencia
10	0.000-0.009	0.000-0.062	0.000-0.113	7.10-16.48	6.09-15.68	6.64-16.27
15	0.000-0.180	0.014-0.155	0.014-0.177	10.56-20.31	10.55-20.13	10.62-20.26
20	0.139-0.370	0.163-0.304	0.129-0.293	14.03-23.77	14.49-24.09	14.26-23.90
25	0.328-0.559	0.366-0.507	0.308-0.471	17.50-27.24	17.93-27.52	17.66-27.30
30	0.518-0.749	0.625-0.766	0.561-0.725	20.97-30.71	20.86-30.44	20.89-30.53

35	0.707-0.938	0.938-1.079	0.900-1.064	24.43-34.18	23.27-32.86	23.98-33.61
40	0.897-1.128	1.307-1.448	1.335-1.499	27.90-37.64	25.18-34.76	26.95-36.58

5. Discusión

Ecuaciones de altura y volumen simplificadas

La relación entre los atributos de los árboles está determinada por la arquitectura del árbol y las condiciones de crecimiento. Como se observa en este trabajo, parte de los árboles plantados en la cuenca del río Órbigo alcanzan un diámetro comercial (DBH > 30 cm) a los 13 años de su plantación. Sin embargo, la media se sitúa en un diámetro algo inferior al óptimo para su venta (DBH de 24.78 cm a los 13 años) por lo que, asumiendo unas tasas de crecimiento en el rango observado (de 1.66 a 2.39 cm⁻¹ año⁻¹) los árboles necesitarían de 15.2 a 16.1 años para alcanzar el diámetro comercial (DBH > 30 cm). Por lo tanto, los resultados muestran que el tiempo de rotación típico en la región de 15 años se ajusta bien a las tasas de crecimiento de este clon. Aun así, la cuenca del Duero está considerada como una zona con buen potencial para la producción del chopo (Emil Fraga *et al.* 2018). Sin embargo, los resultados también muestran que la fertilidad del suelo es el factor más determinante en las tasas del crecimiento. A pesar de que el clima, la geología y el sustrato es el mismo, las parcelas 1 y 2 mostraron más productividad que la parcela 3. La parcela 2 antes de destinarse al cultivo del chopo había tenido un uso como pastizal durante décadas. La parcela 1 también se había dedicado a pastizales hasta ser plantada con chopos en una rotación de 15 años anterior a la actual. Por ello, ambas parcelas habían acumulado materia orgánica en un nivel mucho mayor que la parcela 3, la cual se había usado en cultivo intensivo desde la concentración parcelaria de los años 80 hasta ser plantada con chopos en el 2005. Esto ha resultado en una pérdida de materia orgánica y descenso en la fertilidad. A pesar de ello, las tres parcelas alcanzaron una producción anual de 12 m³ ha⁻¹ año⁻¹, que se considera adecuada para la región (Emil Fraga *et al.* 2018) y alcanzan el rango típico de producción para las plantaciones de la cuenca del Duero (Bravo *et al.* 1996).

Aunque la fertilidad del suelo ha mostrado ser el factor más influyente para el crecimiento, otros factores específicos de cada parcela han podido afectar a la forma y tasa de crecimiento de los árboles controlados. Los árboles de la parcela 1 mostraron el mayor índice de esbeltez, mientras que los árboles de la parcela 3 los más bajos. Estas diferencias se deben seguramente al efecto de las parcelas colindantes. La parcela 3 estaba rodeada por parcelas con cultivos anuales de cereal sin verse afectada por sombreamiento. La parcela 2 era aledaña por el sur a otra plantación de chopos que produjo sombreamiento durante los primeros años de desarrollo de los árboles. La parcela 1 (la más fértil de todas) estaba rodeada por otras plantaciones de chopos en el este, sur y oeste cuando se plantó. Dado que el chopo es un árbol con intolerancia al sombreamiento es sensible a la competición por la luz (Welham *et al.* 2007), la sombra de las plantaciones vecinas ha forzado un mayor crecimiento en altura en detrimento del crecimiento en diámetro a los árboles en las parcelas que se plantaron bajo sombra parcial (Oliver & Larson 1996, Benomar *et al.* 2012, Rodríguez Pleguezuelo *et al.* 2015). Por otra parte, la vecindad de otras plantaciones de chopo no ha tenido solo un efecto negativo, ya que han dado protección frente al viento, lo que a su vez también ha favorecido el crecimiento en altura (Gardiner *et al.* 2016).

Otro indicador de la limitación de luz puede ser el mayor tiempo que necesitaron las parcelas 1 y 2 para alcanzar el crecimiento máximo anual en altura y diámetro comparadas con la parcela 3 (entre 2 y 5 años más, Tabla 2). Este retraso pudo deberse a un mayor efecto de la poda al reducir el auto sombreamiento en estas parcelas que estaban rodeadas de otras plantaciones de chopos (Rauscher *et al.* 2010). Por último, aunque las tres parcelas se regaron igual, la parcela 1 estaba cerca de una corriente de agua permanente mientras que la parcela 3 era la más alejada, lo que pudo inducir un mayor gasto en el desarrollo radicular. De ese modo, los árboles de la parcela 1 que disponían de

agua con más facilidad pudieron crecer más, como se ha comprobado en otras plantaciones (Bagheri *et al.* 2005, Lorenc-Plucinska *et al.* 2017, Asdi & Alimohamadi 2019). Toda esta variabilidad en las condiciones de crecimiento en las parcelas ha causado una gran variabilidad en la altura de árboles de la misma edad, traduciéndose en modelos de altura con amplios intervalos de confianza para las alturas estimadas.

Teniendo en cuenta la hipótesis inicial y el propósito de este estudio, esta falta de diferencias en el DBH entre las parcelas es vital para los dueños de plantaciones, puesto que el diámetro es la única variable que ellos pueden medir fácilmente, y, de ese modo, el único atributo para tomar decisiones de manejo. Por tanto, desde el punto de vista del propietario, las tres parcelas fueron equivalentes, aun con las diferencias significativas en altura y volumen mostradas en este estudio. Siguiendo este argumento, se desarrollaron las ecuaciones de estimación del volumen a partir del DBH, combinando datos procedentes de árboles de las tres parcelas. La combinación de parcelas y edades para la creación del modelo, a pesar de las diferencias significativas encontradas entre parcelas, se considera adecuada ya que al tratarse de un modelo estático, el uso de todos los datos de forma conjunta aumenta el rango de validez del modelo y su aplicabilidad. De todos modos, debe recordarse a los lectores que el objetivo del estudio es desarrollar ecuaciones simples utilizables por personas no profesionales en un gran número de situaciones, más que desarrollar las ecuaciones de estimación del volumen más precisas. Además, se usaron rangos de datos desde los 5 años a los 14 y no solo en el momento de la tala para representar mejor el desarrollo de los árboles en los modelos. Aunque los árboles cambian su alometría según envejecen (Truax *et al.* 2014), los modelos obtenidos muestran ser robustos. De manera que puede aceptarse la hipótesis inicial, ya que la ecuación cuadrática muestra un alto nivel de precisión y un rendimiento aceptable. La siguiente ecuación en rendimiento fue la de potencia, siendo la ecuación lineal la que mostró sesgos más importantes para los árboles de menor y mayor tamaño. Por otra parte, se debe reconocer que el segundo objetivo no se ha alcanzado, puesto que las ecuaciones desarrolladas para estimar la altura de los árboles mostraron una capacidad moderada. A pesar de ello, los resultados también muestran que los árboles tienen la capacidad de mantener crecimientos anuales de volumen similares cambiando su alometría, incluso cuando los crecimientos en altura son significativamente diferentes entre las parcelas, como muestra la robustez de los modelos para volumen frente a los de altura.

Para que los propietarios forestales tomen decisiones de manejo es crucial conocer los precios de la madera en el momento de la tala. Sin embargo, más importante si cabe es saber el volumen de madera que tienen en sus parcelas. Aunque ya hay diversas ecuaciones de volumen para las plantaciones de chopo en España (Bravo *et al.* 1996, Barrio-Anta *et al.* 2007, Rodríguez *et al.* 2010, Rodríguez *et al.* 2013), siempre han sido desarrolladas para alcanzar la máxima precisión utilizando métodos al alcance únicamente de especialistas, utilizando dos o más atributos (diámetro y altura, por ejemplo). De hecho, nuestros resultados obtenidos en los modelos para altura también muestran la dificultad de estimar dicha altura al ser una variable dependiente de múltiples factores de la parcela. Esto refuerza la necesidad de desarrollar ecuaciones de volumen generales que utilicen el DBH como único predictor. Además, muchos de los dueños de plantaciones son jubilados o se jubilarán durante el tiempo de plantación y tienen dificultades en seguir los avances de la tecnología tanto por equipamiento como por práctica. Debido a que la medición precisa de la altura de los árboles sin equipos específicos (generalmente caros) como los hipsómetros, las ecuaciones de dos variables no son prácticas para la mayoría de los propietarios. Existen otros métodos que no necesitan cálculos, como las tablas de crecimiento y rendimiento según la densidad para un DBH y una altura (Montoya Oliver 1988). Sin embargo, la altura de los árboles es difícil de medir (e incluso estimar, como muestran nuestros resultados) con suficiente precisión para usarlas en estas tablas con fiabilidad.

La precisión de las ecuaciones desarrolladas en este estudio debería ser suficiente para dar estimaciones de volumen adecuadas para los propietarios para que tomen decisiones sobre tiempos

de tala, tal y como indican los bajos valores del error crítico de Freese. Esto es especialmente útil al ser el volumen estimado una mejor información que el diámetro del árbol. Además, las ecuaciones son lo suficientemente simples (sobre todo la lineal y la cuadrática) como para poder escribirse en una calculadora integrada en un teléfono inteligente. Esta simplicidad permite que los propietarios midan sus árboles con una cinta métrica, introducir el perímetro para obtener el volumen o altura (Tabla 5), o transformar el perímetro en diámetro y usar los modelos aquí evaluados (Tabla 4). Estas ecuaciones simples dan a los propietarios forestales sin conocimientos específicos la capacidad de iniciar negociaciones con las compañías madereras en una mejor posición que dejando la estimación del volumen en manos de la misma compañía que va a comprar la madera.

Tabla 5. Modelos adaptados al uso de datos de perímetro (P) en cm.

Ecuación	Volumen (m³)	Altura (m)
Lineal	$V = -0.5038 + 0.0121 \cdot P$	$H = 5.0331 + 0.2208 \cdot P$
Cuadrática	$V = -0.0308 - 0.0028 \cdot P + 0.0001 \cdot P^2$	$H = 0.4433 + 0.3652 \cdot P - 0.0010 \cdot P^2$
Potencia	$V = 0.000024 \cdot P^{2.7473}$	$H = 0.9074 \cdot P^{0.7356}$

Limitaciones de la propuesta simplificada

La propuesta aquí utilizada para proporcionar ecuaciones de volumen simplificadas y generalizadas se ha desarrollado con una mirada a la practicidad y utilidad para el usuario final. Esto significa que se ha sacrificado rigor desde un punto de vista estadístico y biológico. Sin embargo, se ha podido argumentar que la validación cruzada (con valores generados aceptables para los modelos) es un enfoque mejor para la evaluación del modelo que las distribuciones residuales (Sileshi 2014). También es posible argumentar que se pueden lograr estimaciones de volumen más precisas utilizando medidas destructivas sobre los árboles del estudio en lugar de utilizar ecuaciones de volumen previamente publicadas. Sin embargo, usar métodos destructivos sobre los árboles para obtener una mayor precisión puede limitar la aplicación de los resultados únicamente a las parcelas experimentales. Por otra parte, ambos métodos para la estimación del volumen (métodos destructivos o el conjunto de ecuaciones) son conceptualmente similares, asumiendo ambos que un objeto irregular como un árbol tiene el volumen de un sólido regular definido por una ecuación matemática. Por tanto, usar un conjunto de modelos (ecuaciones de volumen en este caso) se ha mostrado un método válido para abarcar la incertidumbre tanto del modelo como de los datos tomados (Wang *et al.* 2014, Lo *et al.* 2019), al estimar el crecimiento de las plantaciones de chopo. Además, nuestro enfoque también puede situarse dentro de la corriente que propone que la simplificación del modelo es un medio de aumentar la utilidad del modelo (Wu *et al.* 2007), pues en esencia es un proceso con un solo predictor (DBH) utilizado como sustituto de resultados que utilizan múltiples variables (DBH, altura, etc.). Finalmente, debemos recordar que no hay modelos correctos o incorrectos, si no útiles o no para la tarea para la que se han desarrollado. Así, los modelos complejos se deberían utilizar cuando los modelos simplificados no realicen el trabajo para el que fueron desarrollados (Kimmins *et al.* 2008, Blanco 2013).

Y sobre la representatividad biológica de las ecuaciones propuestas, tanto la lineal como la cuadrática pueden considerarse que no son realistas. En el primer caso, la ecuación lineal asume un ratio de crecimiento constante independiente del tamaño del árbol, obviamente no siendo ese el caso. Los árboles mayores tienen más acceso a la luz, nutrientes, y agua y una capacidad fotosintética mayor, creciendo más rápidamente (en ausencia de otros factores limitantes) que los árboles más pequeños (Blanco *et al.* 2017, Dietrich & Anand 2019). Por otra parte, la ecuación cuadrática puede ser más realista puesto que el volumen o la altura aumentan más rápidamente que el diámetro por su componente cuadrático. Sin embargo, las ecuaciones cuadráticas por definición describen parábolas, por lo que puede darse el caso de que la altura o el volumen estimado alcancen

un mínimo para un diámetro intermedio mientras que se incrementa para bajos DBHs. Para evitar este hecho, las ecuaciones cuadráticas han sido creadas y definidas solo para $DBH \geq 10$ cm. En este caso, debemos recordar otra vez que nuestro objetivo era definir ecuaciones simples que pudieran capturar la mayor variabilidad posible, no crear un modelo biológicamente realista.

Independientemente de nuestros resultados, debemos puntualizar nuevamente que las ecuaciones propuestas en este estudio no pretenden sustituir aquellas desarrolladas previamente para los chopos por otros autores para esta u otras regiones, como el modelo dinámico de Barrio-Anta *et al.* (2007). Puesto que estas ecuaciones incorporan más variables relativas a la forma del árbol, el manejo o el medioambiente, son más adecuadas para aplicaciones que requieren una mayor precisión en la estimación del volumen, la biomasa o las reservas de carbono, y cuya base de usuarios está compuesta por técnicos o especialistas forestales. Por lo tanto, debemos advertir contra el uso de las ecuaciones propuestas en este trabajo para un uso diferente del que se han desarrollado: una estimación rápida del volumen en las plantaciones de chopo en la ribera del río Orbigo por propietarios no especialistas.

6. Conclusiones

Nuestro trabajo ha demostrado que se pueden desarrollar ecuaciones simplificadas para estimar el volumen para las plantaciones de chopo híbrido del noroeste de España. Con una creciente demanda de madera y derivados del papel en un planeta cada vez más urbano, los propietarios rurales están cambiando sus explotaciones agrícolas a plantaciones de chopos, que requieren un manejo mínimo, como medio para obtener ingresos de sus tierras. Las ecuaciones que hemos desarrollado proveen a dichos propietarios de herramientas simples pero eficaces para estimar el volumen de madera ellos mismos. Los resultados también demuestran que este mismo enfoque puede utilizarse en otras especies para las que se presentan múltiples ecuaciones de volumen.

7. Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al propietario de las parcelas (Enrique Blanco) por permitir desarrollar el estudio en su propiedad.

8. Bibliografía

AGENCIA ESPAÑOLA DE METEOROLOGÍA – AEMET. 2020. Regionalización AR4-IPCC. Gráficos de evolución. Regionalización estadística análogos. Castilla y León. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos?w=0&opc1=cle&opc2=P&opc3=Anual&opc4=0&opc6=1 (consultado el 10 de diciembre de 2020).

AMBROSIO TORRIJOS, Y.; PICOS MARTÍN, J.; VALERO GUTIÉRREZ DEL OLMO, E. 2003. Small non industrial forest owners cooperation examples in Galicia (NW Spain). FAO Workshop on forest operations improvements in farm forest. Logarska Dolina (Slovenia). September 9 – 14.

ASADI, F.; ALIMOHAMADI, A. 2019. Assessing the performance of *Populus caspica* and *Populus alba* cuttings under different irrigation intervals. *Agriculture & Forestry*, 65: 39-51.

BAGHERI, R.; GHASEMI, R.; CALAGARI, M.; MERRIKH, F. 2005. Effect of different irrigation interval on superior poplar clones yield. Research Institute of Forest and Rangeland- RIFR. FAO, Tehran, Iran.

BARRIO-ANTA, M.; SIXTO BLANCO, H.; CAÑELLAS REY DE VIÑAS, I.; GONZÁLEZ ANTOÑANZAS, F. 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I - 214' en la meseta norte y centro de España. *Forest Systems*, 16: 65-75.

BENOMAR, L.; DESROCHERS, A.; LAROCQUE, G.R. 2012. The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. *Trees*, 26: 939-949.

BENNET, N.D.; CROKE, B.F.W.; GUARISO, G.; GUILLAUME, J.H.A. et al. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40, 1-20.

BLANCO, J.A. 2013. Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. *Ecosistemas*. 22(3), 1-5.

BLANCO, J.A.; LO, Y.H.; WELHAM, C.; LARSON B. 2017. Productivity of forest ecosystems. In: Innes, J.I.; Tikina A. (Ed.). *Sustainable Forest Management: from principles to practice*. Pp 72-100. Earthscan, London, UK.

BLANCO, R. 2020. Estimación de tasas de crecimiento y producción de plantaciones de chopo (*Populus x euroamericana*) en la ribera media del Duero. Trabajo de fin de máster. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España.

BRAVO, F.; GRAU, J.M.; GONZÁLEZ ANTOÑANZAS, F. 1996. Análisis de modelos de producción para *Populus x euroamericana* en la cuenca del Duero. *Forest Systems*, 5: 77-95.

CARRERAS, A.; TAFUNELL, X. (coord.) 2005. Estadísticas históricas de España: siglos XIX-XX. 2a Ed. Fundación BBVA. Bilbao, España.

CHERLET, M.; HUTCHINSON, C.; REYNOLDS, J.; HILL, J. et al. (Eds.). 2018. *World Atlas of Desertification*. Publication Office of the European Union, Luxembourg.

CHOPO EN CASTILLA Y LEÓN. 2021. Chopo en Castilla y León. Disponible en: <http://www.populuscyl.es/> (Consultado el 25 de marzo d 2022).

CHRISTERSSON, L. 2006. Silvicultura de rotación corta: un complemento de la silvicultura "convencional". *Unasylva*, 223.

DIETRICH, R.; ANAND, M. 2019. Trees do not always act their age: size-deterministic tree ring standardization for long-term trend estimation of shade-tolerant trees. *Biogeosci.*, 16: 4815-4827.

DOMINGUEZ, G.; SHANNON, M. 2011. A wish, a fear and a complaint: understanding the (dis)engagement of forest owners in forest management. *Eur J Forest Res.* 130: 435-450.

EMIL FRAGA, E.; FIDALGO, L.; ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, E.; RODRIGUEZ SOALLEIRO, R. et al. 2018. Crecimiento a medio turno de plantaciones madereras del clon RASPAJE en suelo ácido en Galicia. In *Proceedings of the II Simposio del Chopo*. Pp. 63-72. Sociedad Pública de Infraestructuras y Medio Ambiente de Castilla y León: Valladolid, España.

FERNÁNDEZ MANSO, A.; HERNANZ ARROYO, G. 2004. El chopo (*Populus* sp.): Manual de gestión forestal sostenible. Junta de Castilla y León. España.

FREER-SMITH, P.; MUYS, B.; BOZZANO, M.; DRÖSSLER, L. *et al.* 2019. Plantation forests in Europe: challenges and opportunities. From Science to Policy 9. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs09>

GARDINER, B.; BERRY, P.; MOULIA, B. 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Sci*, 245: 94-118.

GAUSSEN, H.; BAGNOULS, F. 1953. Saison seche et indice xerothermique. Université de Toulouse, Faculté des Sciences. Toulouse, Francia.

HJELM, B. 2013. Stem taper equations for poplars growing on farmland in Sweden. *Journal of Forestry Research*, 24: 15-22.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA – INE. Encuesta sobre la estructura de las explotaciones agrícolas. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176854&menu=ultiDatos&idp=1254735727106 (consultado el 3 de enero de 2021).

INSTITUTO TECNOLÓGICO AGRARIO DE CASTILLA Y LEÓN - ITACYL. 2021. Visor de datos de suelo. Disponible en: https://suelos.itacyl.es/visor_datos (consultado el 3 de enero de 2021).

KIMMINS, J.P.; BLANCO, J.A.; SEELY, B.; WELHAM, C.; SCOULLAR, K. 2008. Complexity in Modeling Forest Ecosystems; How Much is Enough? *For. Ecol. Manage.* 256: 1646-1658.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. 1936. Das geographische System der Klimate. Berlin. Alemania.

LO, Y.H.; BLANCO, J.A.; GONZÁLEZ DE ANDRÉS, E.; IMBERT, J.B.; CASTILLO, F.J. 2019. CO₂ fertilization plays a minor role in long-term carbon accumulation patterns in temperate pine forests in the Pyrenees. *Ecol. Model*, 407: 108737.

LORENC-PLUCINSKA, G.; WALENTYNOWICZ, M.; LWANDOWSKI, A. 2017. Poplar growth and wood production on a grassland irrigated for decades with potato starch wastewater. *Agroforestry Systems*, 91: 307-324.

MARZILIANO, P.A.; RUSSO, D.; ALTIERI, V.; MACRÌ, G.; LOMBARDI, F. 2018. Optimizing the sample size to estimate growth in I-214 poplar plantations at definitive tree density for bioenergetic production, *Agronomy Research*, 16: 821-837.

MONTOYA OLIVER, J.M. 1988. Chopos y choperas. Mundi Prensa, Madrid, España.

OLIVER, C.D.; LARSON B.C. 1996. Forest Stand dynamics: update edition. John Wiley and Sons. New York. USA.

QUINN, G.P.; KEOUGH, M.J. 2002. Experimental Design and Data Analysis for Biologists. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

RAUSCHER, H.M.; ISEBRANDS, J.G.; HOST, G.E.; DICKSON, R.E.; *et al.* 1990. ECOPHYS: an ecophysiological growth process model for juvenile poplar. *Tree Physiology*, 7: 255-281.

RODRÍGUEZ, F.; PEMÁN, J.; AUNÇOS, A. 2010. A reduced growth model based on stand basal area. A case for hybrid poplar plantations in northeast Spain. *For. Ecol. Manag.* 259, 2093–2102.

RODRÍGUEZ PLEGUEZUELO, C.R.; DURÁN ZUAZO, V.H.; BIELDERS, C.; JIMÉNEZ BOCANEGRA, J.A.; *et al.* 2015. Bioenergy farming using woody crops: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 35: 95-119.

RUEDA, J.; GARCÍA CABALLERO, J.L. 2013. Parcela de experimentación de clones de chopos LE-3 Gradefes. Junta de Castilla y León: Valladolid, España.

RUEDA, J.; GARCÍA CABALLERO, J.R. 2018. Parcelas de experimentación de clones de chopos LE-4 La Milla del Río. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid, España.

RUEDA, J.; GARCÍA CABALLERO, J.L.; LÓPEZ NEGREDO, L.; GÓMEZ CÁCERES, C. 2006. Parcela de experimentación de clones de chopos LE-1 Valencia de Don Juan. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid, España.

SCHUWIRTH, N.; BORGWARDT, F.; DOMISCH, S.; FRIEDRICHS, M. *et al.* 2019. How to make ecological models useful for environmental management. *Ecologica IModelling* 411, 108784.

SILESHI, G.W. 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329: 237-254.

THEIL, H. 1966. *Applied Econometric Forecasting*. North-Holland. Amsterdam, The Netherlands.

TRUAX, B.; GAGNON, D.; FORTIER, J.; LAMBERT, F., 2014. Biomass and volume yield in mature hybrid poplar plantations on temperate abandoned farmland. *Forests*, 5: 3107-3130.

VAINIO, A.; PALONIEMI, R. 2012. Forest owners and power: a Foucauldian study on Finnish forest policy. *Forest Policy and Economics*, 21: 118-125.

VANCLAY, J.; SKOVSGAARD, J.P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling*, 98: 1-12.

WANG, F.; MLADENOFF, D.J.; FORRESTER, J.A.; BLANCO, J.A. *et al.* 2014. Multimodel simulations of forest harvesting effects on long-term productivity and CN cycling in aspen forests. *Ecological Applications*, 24: 1374-1389.

WELHAM, C.; VAN REES, K.C.J.; SEELY, B.; KIMMINS, J.P. 2007. Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: weed competition and fertilizer effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 37: 356-370.

WU, S.; HARRIS, T.J.; MCAULEY, K.B. 2007. The use of simplified or misspecified models: the linear case. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 85: 386-398.