



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

Nuevos modelos para estimación de biomasa y CO₂ fijado en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Galicia

CALAMA SAINZ, R.¹, RUÍZ FERNÁNDEZ, F.², MENÉNDEZ MIGUÉLEZ, M.¹, MADRIGAL CASANUEVA, G.¹, GARCÍA CALAMA, T.³, PARDOS MÍNGUEZ, M.¹

¹ Departamento de Dinámica y Gestión de los Sistemas Forestales. CIFOR. INIA-CSIC.

² Departamento I+D Forestal. ENCE Energía y Celulosas.

³ ETS Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. UPM.

Resumen

Las plantaciones de eucalipto, aparte de su objetivo preferente como productoras de celulosa, generan otros servicios ecosistémicos, entre los que destaca su papel como fijadoras de C atmosférico. En la comunicación se presentan una serie de nuevas herramientas para la determinación de la biomasa y C fijado por las plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*:

- Ecuaciones alométricas de biomasa individual
- Modelos de estimación de biomasa y C fijado por ha, en función de la edad y la densidad de plantación
- Curvas de distribución de biomasa individual en una plantación

En el ajuste de los modelos se han empleado datos de 18 parcelas instaladas en las provincias de A Coruña y Pontevedra y 81 árboles tipo en los que se realizaron muestreos destructivos de biomasa. Los modelos ajustados se han comparado con los modelos existentes. Los resultados muestran la extraordinaria capacidad de fijación de biomasa y CO₂ por estas plantaciones, encontrando valores de 15 t M.S. ha⁻¹año⁻¹ durante los primeros 5 años tras la plantación, y superando 30 t M.S. ha⁻¹año⁻¹ a partir de esa edad.

Palabras clave

Ecuaciones alométricas, curvas distribución biomasa, eucalipto.

1. Introducción

Los árboles y los bosques tienen la capacidad de capturar el C atmosférico por medio de la fotosíntesis, generando además otros servicios ecosistémicos y productos maderables que pueden desplazar materiales más costosos en términos de uso de combustibles fósiles (Waring et al., 2020). Es por ello que el aumento de la superficie forestal por medio de la reforestación y plantación de tierras no forestales ha sido propuesto como una herramienta efectiva para la mitigación del cambio climático al reducir la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Chazdon & Brancalion, 2019). El cumplimiento de los objetivos de neutralidad climática, en el que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero se compensen con las absorciones, requiere de eficaces medidas para contabilizar la capacidad de sumidero de CO₂ en los bosques. En el sector de usos de la tierra, cambios de uso y silvicultura (LULUCF) uno de los compartimentos a considerar como sumidero es el de las tierras forestadas (aumento de la superficie forestal debido a la acción humana) durante los primeros 20 años tras la plantación (Robla y González, 2018), siendo necesario por parte de los estados dar cifras anuales sobre la capacidad de fijación de estas repoblaciones y plantaciones jóvenes. A este objeto la Encomienda de Gestión EG17-042-C2.2 suscrita entre el INIA y el MITECORDER tiene como finalidad la construcción de herramientas fiables y sencillas para contabilizar la biomasa y C fijados en repoblaciones y plantaciones jóvenes para las principales especies forestales empleadas en España (Calama et al., 2021). Estas herramientas deben permitir dar estimaciones eficientes desde el primer año de la plantación, y poder ser aplicadas sobre los datos generales de los que dispone la

administración pública, muchas veces referidos únicamente a especie, año de plantación y superficie reforestada.

Las plantaciones puras de eucalipto ocupan en la Comunidad Autónoma de Galicia unas 290.000 ha (MARM, 2011), lo que supone el 20% de la superficie forestal de la comunidad, a lo que debe añadirse su presencia en otras 145.000 ha, en mezclas con *Pinus pinaster* (principalmente) y *Quercus robur*. Esta cifra indica una multiplicación por 6 de las plantaciones con eucalipto en los últimos 30 años, pasando de las 46.000 ha identificadas en el ciclo IFN2 (1986-1996), las 175.000 ha del ciclo IFN3 (1997-2007) hasta las 290.000 ha actuales, cifra que sigue aumentando. La mayor parte de estas plantaciones se han realizado sobre terrenos de matorral, pastizales y terrenos agrícolas abandonados, o sobre plantaciones de pinar preexistente (Calvo de Anta et al., 2019). *Eucalyptus globulus* ha sido la especie predominantemente empleada, aunque desde mediados de los años 90 *Eucalyptus nitens* está siendo más utilizado, por su mayor resistencia al frío y mejores tasas de crecimiento, en plantaciones, principalmente en las provincias de A Coruña y Lugo (Perez-Cruzado et al., 2011). Las plantaciones de eucalipto aportan más del 60% de la madera que se corta en Galicia, alcanzando las cortas en 2018 más de 5,9 millones de m³ con una facturación superior a los 200 millones de €, y siendo responsables de 5500 puestos de trabajo directo (Calvo de Anta et al. 2019). Aparte del destino preferencial para la producción de celulosa, recientemente se ha planteado el uso orientado a la producción de biomasa con destino energético en plantaciones de alta densidad y turno corto (González-García et al., 2013). Junto a la provisión de estos servicios ecosistémicos, la gran capacidad de crecimiento de las plantaciones de eucalipto hace que jueguen un papel relevante como fijadoras de CO₂, siendo por tanto necesario disponer de herramientas adecuadas para su cuantificación.

Hasta la fecha se han desarrollado distintos modelos y ecuaciones para la determinación de la biomasa fijada por las plantaciones de eucalipto en el NO de España. En el caso de *E. globulus* los trabajos iniciales de Montero et al. (2005), Merino et al. (2005) y Álvarez-González et al. (2005) plantean ecuaciones de biomasa para las distintas fracciones del árbol individual, estando ajustadas con árboles tipo con diámetro superior a 7.5 cm de diámetro y edades superiores a los 5 años, lo que restringe su uso en edades iniciales. La falta de muestra en edades inferiores a los 4-5 años ocurre también en los modelos más recientes de Herrero et al. (2014), Garcia-Villabril et al. (2014) o Vega-Nieva et al. (2015). Para el caso de *Eucalyptus nitens* gran parte de los modelos existentes (González-García et al. 2013) se han centrado en plantaciones intensivas de alta densidad y turno corto. El trabajo más completo es el de Perez-Cruzado et al. (2011), que incluye a las dos especies, plantaciones de diferentes edades y proporciona ecuaciones a nivel de árbol y de masa, aunque no considera la edad como posible variable explicativa.

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es mejorar las herramientas de estimación de biomasa fijada por plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* en Galicia, al objeto de facilitar su uso en las estimaciones que a nivel nacional debe realizar el MITECORD. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Mejorar las ecuaciones de biomasa de árbol individual, incluyendo pies de plantaciones con edades desde los 2 años
- Ajuste de modelos para la biomasa total por ha plantada en función de la edad y la densidad de plantación
- Construir modelos de distribución de biomasa de los pies individuales y estudiar su variación con la edad

3. Material y Métodos

Parcelas INIA-ENCE

En el mes de julio de 2021 el INIA instaló un total de 18 parcelas en plantaciones de eucalipto gestionadas por ENCE en distintas zonas de las provincias de A Coruña y Pontevedra, correspondiendo 10 a plantaciones de *E. globulus* y 8 a plantaciones de *E. nitens*, abarcando un rango de edad entre los 2 y los 11 años. Las parcelas son rectangulares, de tamaño tal que incluyese un número teórico de 40 pies, seleccionando 4-5 filas de plantación y 8-10 huecos de plantación por fila. Los marcos de plantación habituales son 2 x 4 (superficie parcela 300 m²), oscilando entre el 1.6 x 4 (superficie parcela 256 m²) y 2 x 4,5 (sup parcela 352 m²).

De cada uno de los pies de la parcela se medía el diámetro de tocón, el diámetro normal (medido a 1.30 m) y la altura total, apuntándose también las marras localizadas. Asimismo se toman datos generales sobre la parcela, tales como orientación, pendiente y presencia y cobertura de matorral. Los datos de las parcelas muestreadas se incluyen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos generales de las 18 parcelas muestreadas.

Provincia	TM	Año Plantación	UTM X	UTM Y	Altitud	Edad	Especie	N	AB	Hm
A Coruña	Baiñas	2019	495568	4764497	370	2	<i>E. nitens</i>	1187	1,84	3,54
A Coruña	Baiñas	2019	496244	4764024	392	2	<i>E. nitens</i>	1133	2,03	3,67
A Coruña	Boimorto	2016	570943	4766296	463	5	<i>E. nitens</i>	1283	15,05	14,47
A Coruña	Boimorto	2016	570952	4766291	463	5	<i>E. nitens</i>	1571	23,35	16,18
A Coruña	Boimorto	2014	571029	4766385	453	7	<i>E. nitens</i>	1579	32,69	20,05
A Coruña	Boimorto	2014	570924	4766398	462	7	<i>E. nitens</i>	1286	21,26	18,26
A Coruña	Boimorto	2011	570970	4766558	443	10	<i>E. nitens</i>	1464	41,61	23,59
A Coruña	Boimorto	2011	571022	4766668	432	10	<i>E. nitens</i>	1321	38,14	23,25
Pontevedra	Covelos	2009	551275	4676641	315	12	<i>E. globulus</i>	1219	26,11	23,19
Pontevedra	Covelos	2009	551251	4676746	297	12	<i>E. globulus</i>	1524	32,52	21,16
Pontevedra	Covelos	2011	551092	4676854	281	10	<i>E. globulus</i>	1367	11,22	15,64
Pontevedra	Covelos	2011	551132	4676883	284	10	<i>E. globulus</i>	1333	20,71	22,39
Pontevedra	Touton	2013	541062	4677804	314	8	<i>E. globulus</i>	1161	14,57	16,07
Pontevedra	Touton	2013	541020	4677770	304	8	<i>E. globulus</i>	1091	18,51	17,17
A Coruña	Istipoi	2017	500168	4721200	98	4	<i>E. globulus</i>	1523	9,58	10,57
A Coruña	Istipo	2017	500164	4721222	97	4	<i>E. globulus</i>	1523	7,69	9,16
Pontevedra	Erville	2019	527811	4666635	282	2	<i>E. globulus</i>	1156	1,29	4,94
Pontevedra	Erville	2019	527990	4666709	270	2	<i>E. globulus</i>	937	1,07	4,78

TM: término municipal, N: número de pies ha⁻¹, AB: área basimétrica /m²ha⁻¹, Hm: altura media (m), UTM referido al huso 29

Muestreos destructivos

En el entorno de las parcelas antes citadas se procedió a apeaar un total de 31 ejemplares de *Eucalyptus globulus* y 26 de *Eucalyptus nitens* al objeto de determinar la biomasa contenida en los mismos. La muestra de pies apeados se completó con los datos de otros 24 pies de *Eucalyptus globulus* apeados y medidos por el INIA siguiendo la misma metodología en el marco de anteriores proyectos de investigación. Antes de proceder a su apeo se procedió a medir diámetro tocón, diámetro normal, diámetro de copa (en dos direcciones perpendiculares) y altura total. Una vez apeado el árbol se procedía a separar en la fracción de (1) hojas y ramillos con diámetro inferior a 2 cm y (2) fuste y ramillos con diámetro superior a 2 cm. Cada fracción se pesaba por separado en campo, obteniendo el peso verde del árbol. Asimismo, una muestra de cada una de las dos fracciones era llevada a laboratorio, donde se procedía a su secado en estufa a 60 °C durante un tiempo no

inferior a 2 semanas, pudiendo determinar la humedad de cada fracción. A partir de este dato fue posible determinar el peso seco de cada árbol. La tabla 2 muestra los datos medios de los pies apeados.

Tabla 2. Datos de los 81 pies utilizados en el ajuste de las ecuaciones de biomasa de árbol individual.

Especie	n	d	d min-max	h	h min-max	bm	bm min-max
<i>E. globulus</i>	55	17,8	3,1-54	14,7	4,0-29,22	266,2	2,0 - 1590,8
<i>E. nitens</i>	26	10,1	2,8 - 22	12,7	2,6-28,9	56,8	1,3- 299,7

n: número de pies en la muestra, d: diámetro medio (cm), h: altura media (m), bm; biomasa media (kg M.S. árbol⁻¹)

Ecuaciones alométricas de biomasa de árbol individual

En los estudios de modelización de biomasa arbórea tradicionalmente se han utilizado modelos alométricos no lineales de tipo potencial para la estimación de las diferentes fracciones estudiadas o de la biomasa total (Reed y Green, 1985). La formulación matemática general de este tipo de modelos es la siguiente:

$$Y = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} + \varepsilon \quad (1)$$

donde Y es la biomasa total o la biomasa de las diferentes fracciones analizadas, X_j es la variable independiente (predictora) del modelo, β_j son los parámetros del modelo y ε el error.

En el caso de *E. globulus* y *E. nitens* se ha procedido al ajuste de la biomasa total (parte aérea) del árbol, utilizando como potenciales predictoras bien el diámetro normal (d), la altura total (h), o la combinación d²h. Los distintos modelos según variable predictora se compararon entre sí utilizando diferentes estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) (ec. 2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC) (ec. 3). El coeficiente de determinación ajustado indica la proporción de la varianza total que es explicada por el modelo; mientras que la raíz del error medio cuadrático analiza la precisión de la estimación y se expresa con las mismas unidades que la variable dependiente. Las expresiones de los estadísticos utilizados se muestran a continuación:

$$R^2_{adj} = 1 - \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (2)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-p)}} \quad (3)$$

donde Y_i , \hat{Y}_i y \bar{Y} son los valores observados, predichos y medio de la variable dependiente (biomasa total de la parte aérea), respectivamente; n es el número total de observaciones utilizadas para el ajuste del modelo; p es el número de parámetros del modelo.

Las ecuaciones de biomasa presentan frecuentemente heterocedasticidad en la varianza residual, que ha sido evaluada de manera gráfica y corregida aplicando regresión mediante mínimos cuadrados ponderados.

Modelos para la estimación de la biomasa del árbol medio y biomasa por ha en función de la edad

La mejor ecuación de biomasa individual para cada especie, seleccionada en el apartado anterior, se ha empleado para calcular la biomasa individual de cada una de los árboles de cada parcela. Una vez conocida la biomasa de cada uno de los árboles se ha procedido a calcular el valor medio de biomasa individual para los árboles de la parcela (bm , kg). Por último, para cada una de las citadas especies, se ha estimado la biomasa total por parcela, como la suma de la biomasa de los pies individuales de la especie, y posteriormente se ha extrapolado a la hectárea en base a la superficie de cada parcela de muestreo (Bha , kg ha⁻¹). Ambas variables se relacionan, en esta primera fase, con la edad de la plantación, y en el caso de la biomasa total por hectárea, se analizará si la

consideración de la densidad N – bien como un término adicional en el modelo, bien como un multiplicador de la biomasa predicha para el árbol medio \widehat{bm} – mejora significativamente las predicciones del modelo. Se plantea los siguientes modelos de tipo potencial:

$$bm = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1} \quad (4)$$

$$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1} \quad (5)$$

$$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1} \cdot N^{\beta_2} \quad (6)$$

$$Bha = N \cdot \widehat{bm} \quad (7)$$

Comparando nuevamente las distintas alternativas en función de los estadísticos coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y la raíz del error medio cuadrático (REMC).

Curvas de distribución de biomasa individual

Se propone el ajuste de la curva de distribución de biomasa individual de cada parcela a una distribución teórica de Weibull biparamétrica, cuya función de densidad viene dada por:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right] \quad (8)$$

Donde x representa la biomasa del árbol, y b y c son el parámetro de escala y forma, respectivamente. Una vez realizado el ajuste a cada parcela, se procede a identificar posibles variables de la parcela (biomasa del árbol medio, altura del árbol medio y edad) que presenten una alta correlación con estos parámetros, de forma tal que permita caracterizar la distribución en función de estas variables. Se propone un modelo lineal para la predicción de los parámetros b y c de la distribución en función de las variables edad, biomasa media y altura media, de forma tal que:

$$b = b_0 + b_1 \cdot X$$

$$c = c_0 + c_1 \cdot X$$

Donde X es la edad de la plantación, biomasa del árbol medio o altura del árbol medio de la parcela. El método seleccionado para la predicción de los parámetros es el de regresión de la función de distribución acumulativa (Cao et al. 2004), que minimiza la suma de cuadrados de las diferencias entre la función de distribución observada y modelizada.

4. Resultados

Ecuaciones alométricas de biomasa de árbol individual

El ajuste de los modelos de biomasa de árbol individual (tabla 3) demuestra que para ambas especies la combinación d^2h es la que mejor explica, alcanzando coeficientes de determinación ajustados superiores al 98%. El diámetro normal muestra también una alta capacidad predictiva, mientras que los modelos que consideran como predictiva únicamente la altura presente una bondad del ajuste muy inferior para el caso del *E. globulus*, no siendo así para *E. nitens*. La figura 1 muestra el grado de concordancia entre los valores observados y predichos de biomasa para ambas especies

Tabla 3. Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos de biomasa de árbol individual.

Especie	n	Predictora	β_0	β_1	REMC	R^2_{adj}
<i>E. globulus</i>	55	d	0.2158 ± 0.0464	2.2438 ± 0.0580	63.9989	0.9745
		h	0.0272 ± 0.0323	3.2283 ± 0.3996	339.1332	0.2858
		d^2h	0.0772 ± 0.0118	0.8981 ± 0.0153	54.3514	0.9816
<i>E. nitens</i>	26	d	0.0201 ± 0.0893	3.1036 ± 0.1533	13.7397	0.9705
		h	0.0089 ± 0.0054	3.0813 ± 0.1894	14.6899	0.9662

		d²h	0.0089 ± 0.0206	1.0949 ± 0.0251	5.6733	0.9950
--	--	-----------------------	------------------------	------------------------	---------------	---------------

d: diámetro normal (cm), h: altura total (m)

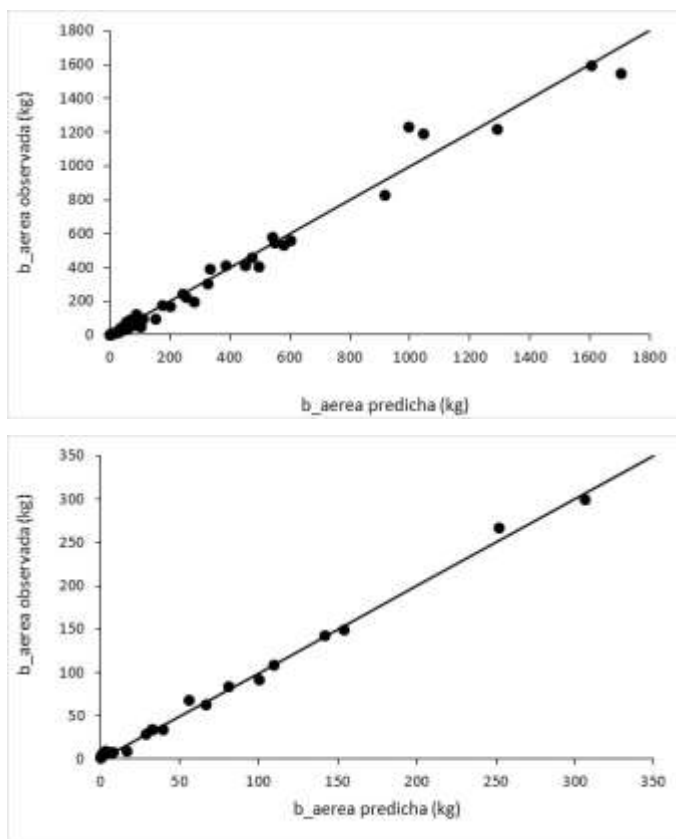


Figura 1. Grado de concordancia (observados – predichos) para las ecuaciones de biomasa de árbol individual en *E. globulus* (superior) y *E. nitens* (inferior) en función de d^2h

Ecuaciones alométricas de biomasa por hectárea repoblada

La tabla 4 muestra los resultados del ajuste de los distintos modelos para la biomasa por hectárea plantada y biomasa del árbol medio en función de la edad y la densidad. Los modelos que únicamente consideran la edad presentan menor capacidad predictiva que los modelos que incluyen a ésta junto con la densidad de plantación. En el caso de conocer las dos variables se recomienda emplear el modelo tipo (7), en el que la biomasa total por ha se calcula como el producto entre la biomasa estimada para el árbol medio de la parcela y la densidad de plantación. En el caso de no disponer de la densidad, los modelos basados en la edad (figura 2) proporcionan una estimación realista de la evolución de la biomasa.

Tabla 4. Estadísticos de ajuste de los modelos de biomasa del árbol medio (bm) y por hectáreaa plantada (Bha). En negrita los modelos recomendados.

Especie	n	Modelo	β_0	β_1	β_2	REMC	R^2_{adj}
<i>E. globulus</i>	10	$bm = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1}$	1,1585	2,1144		1,2909	0,7932
		$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1}$	465,2	2,5984		46354	0,8447
		$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1} \cdot N^{\beta_2}$	1,3885	2,3499	0,8898	46911	0,8410
		$Bha = N \cdot \widehat{bm}$				42523	0,8693
<i>E. nitens</i>	8	$bm = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1}$	1,8308	2,0828		1,4140	0,9740
		$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1}$	3186,5	1,9859		26972	0,9519
		$Bha = \beta_0 \cdot edad^{\beta_1} \cdot N^{\beta_2}$	0,0102	2,0289	1,7329	13430	0,9881
		$Bha = N \cdot \widehat{bm}$				15177	0,9848

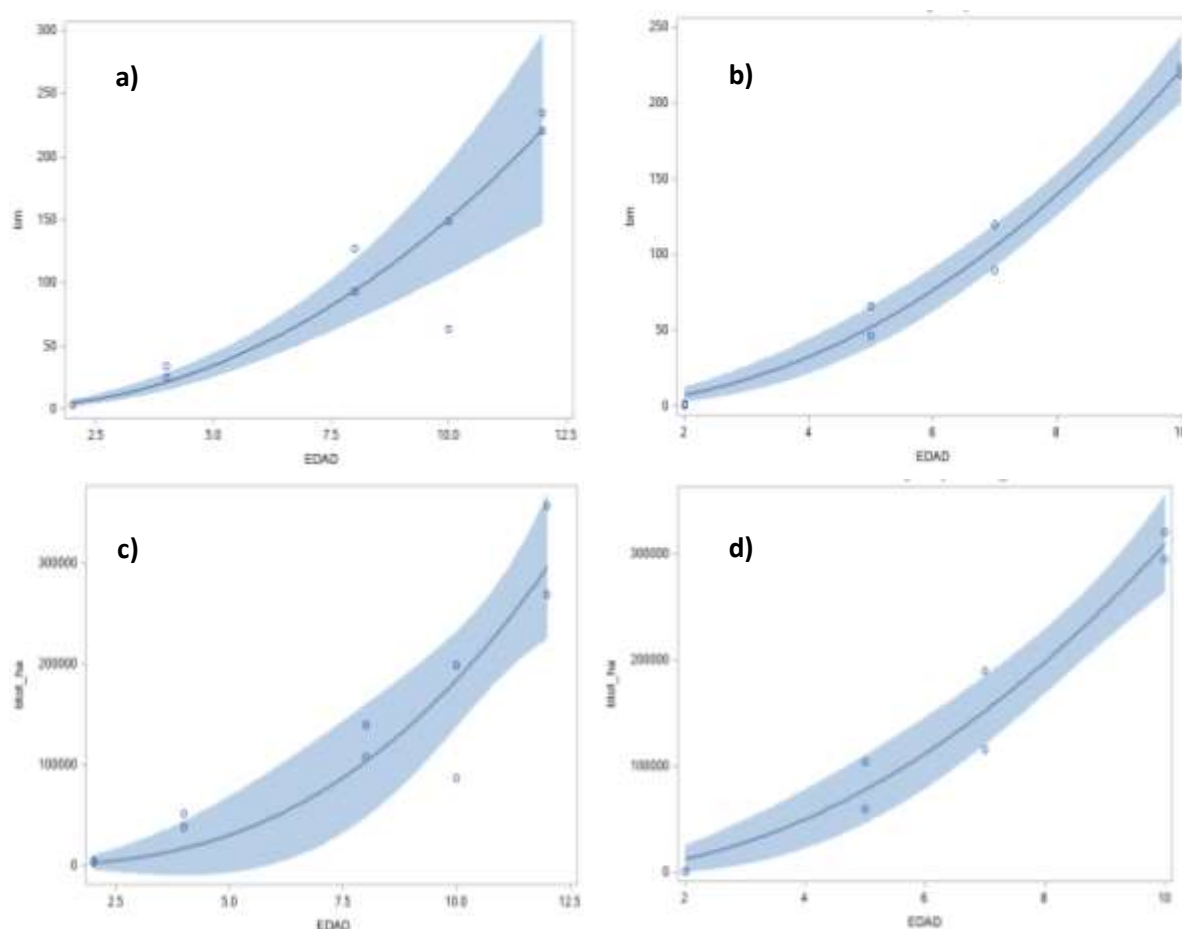


Figura 2. Valores predichos e intervalo de confianza para los modelos para biomasa del árbol medio y biomasa por ha repoblada de *E. globulus* (a y c) y *E. nitens* (b y d) en función de la edad.

Curvas de distribución de biomasa individual

El ajuste de la función Weibull biparamétrica a los datos de cada una de las parcelas revela que, de acuerdo al test de Cramer-von-Mises, únicamente en 2 parcelas de *Eucalyptus globulus* es necesario rechazar la hipótesis nula de concordancia entre la distribución real y la teórica, considerando un p-valor de 0.01. Los resultados de la predicción de los parámetros de la curva de Weibull biparamétrica indica que la biomasa del árbol medio de la parcela (que puede calcularse a partir de los modelos presentados en el apartado anterior) es la que presenta una mejor capacidad predictiva para ambas especies, siendo la edad la segunda mejora predictora.

Tabla 5. Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos de distribución de biomasa de árbol individual

Especie	Predictor	b ₀	b ₁	c ₀	c ₁	SSE
<i>E. nitens</i>	Edad	-43.5252	22.3835	1.3144	-0.0462	0.0351
	hm	-23.2425	6.8403	1.0913	-0.0107	0.0748
	bm	0.0067	1.0546	1.2430	-0.00164	0.0132
<i>E. globulus</i>	Edad	-29.5985	16.8351	2.7404	-0.1752	0.1851
	hm	-34.8626	8.0619	1.9883	-0.0471	0.2192
	bm	0.0278	1.1074	3.2248	-0.0109	0.0469

SSE: suma de cuadrados del error

Las curvas de frecuencia acumulada predicha por los modelos vuelven a mostrar la mayor tasa de crecimiento de *E. nitens*, especie en la que el percentil 80 de biomasa individual en la plantación a los 3, 6 y 9 años de edad es de 35 kg, 145 kg y 265 kg, mientras que para *E. globulus* los valores son 26 kg, 95 kg y 182 kg, respectivamente (fig. 3). Asimismo, a igualdad de valores de biomasa media entre las dos especies lo que se observa es que en *E. nitens* tiende a aparecer una mayor disparidad de biomasa individual, apareciendo en la misma parcela individuos con pequeño y gran tamaño, mientras que en *E. globulus* los tamaños tienden a estar más concentrados en torno al valor medio (fig. 4).

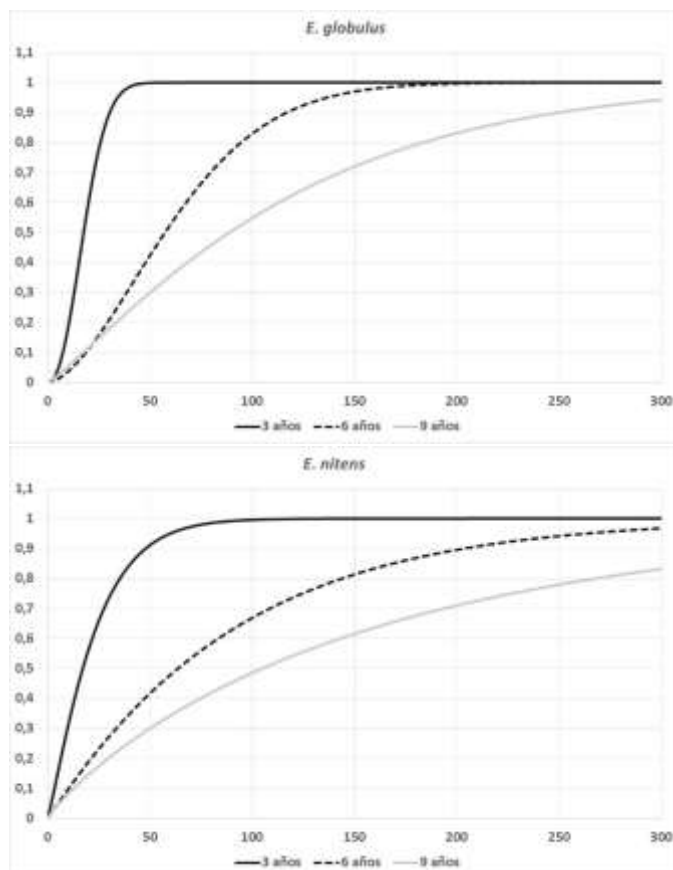
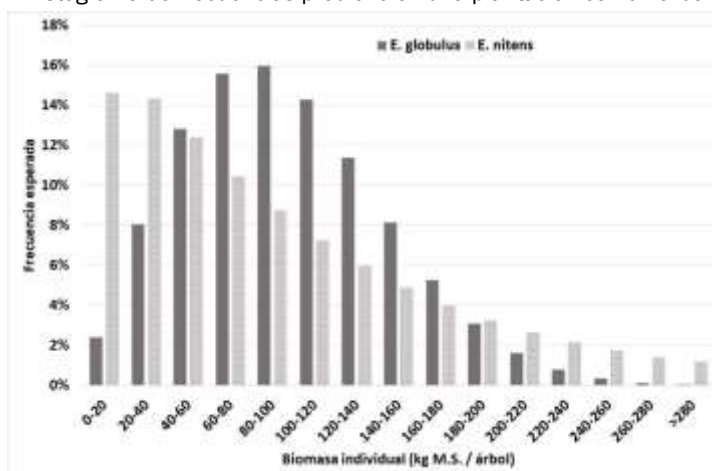


Figura 3. Curvas predichas de frecuencias acumulada de biomasa individual en función de la edad de plantación.

Figura 4. Histograma de frecuencias predicho en una plantación con un árbol medio de biomasa 100 kg.



5. Discusión y conclusiones

En el presente trabajo se muestra un conjunto de herramientas que permiten la estimación de manera eficiente y sencilla de la biomasa y C fijado a escala de árbol y de masa para plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* en Galicia. Se proponen unas nuevas ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa aérea del árbol individual, que evitan la estimación de la biomasa total como suma de la de cada uno de los componentes, con lo que se evitan problemas asociados al empleo de los modelos aditivos de biomasa al aplicarlos fuera del rango inicial de datos de ajuste (Menéndez-Miguel et al. 2021), y que pueden conducir a estimaciones insesgadas en árboles de pequeño y gran tamaño.

En el caso de *E. globulus* el conjunto de ajuste incluye 55 pies con diámetros entre 2,9 y 54 cm y biomasa seca entre 2 y 1591 kg, constituyendo la muestra de rango más amplio de entre las empleadas en el ajuste de los modelos preexistentes, donde rara vez se incluyen pies de menos de 5 cm y de más de 30 – 40 cm de diámetro normal. Al compararlo con otros modelos existentes se comprueba que el nuevo modelo presenta un mejor comportamiento para las clases inferiores y – sobre todo – superiores de diámetro, no mejorando las estimaciones en el caso de las clases medias, lo que viene motivado por la amplitud del rango y la sencillez del modelo, que al contar únicamente dos parámetros es forzado a ajustarse bien en las clases extremas a costa de la precisión en las clases intermedias (tabla 6). En cuanto a *E. nitens*, el modelo incluye en el ajuste pies entre los 4 y los 22 cm de diámetro, muestra con mayor rango que la de las ecuaciones propuestas por González-García et al. (2013), siendo ésta la que mejor estima en las clases de diámetro inferior a 5 cm, pero subestimando muy significativamente en el caso de las clases de diámetro superior (tabla 6), algo que también le sucede a las ecuaciones de Pérez-Cruzado et al. (2011). Esta comparación no puede considerarse nunca una validación propiamente dicha (al emplearse los propios datos empleados en el ajuste), pero sí permite ver las fortalezas y debilidades de los distintos modelos disponibles. Se recomienda que, para ambas especies, la muestra se extienda a un mayor rango de diámetros, alturas y condiciones de rodal.

Tabla 6. Comparación los nuevos modelos de biomasa individual para *E. globulus* y *E. nitens* y modelos preexistentes, en términos de raíz del error medio cuadrático relativo (REMC / biomasa media), según clases de diámetro.

	Clase diam (cm)	Nuevo	Pérez-Cruzado (2011)	Vega-Nieva (2015)	Montero (2005)	Herrero (2013)	G. Villabrille (2015)
<i>E. globulus</i>	<5	34,9%	31,1%	12,0%	80,5%	70,4%	49,1%
	5-10	47,9%	33,0%	22,7%	34,1%	26,6%	40,5%
	10-20	43,0%	36,5%	28,5%	20,1%	23,0%	41,5%
	30-30	13,8%	32,4%	28,7%	25,0%	17,5%	35,9%
	30-40	8,4%	24,5%	17,1%	15,6%	12,0%	29,2%
	>40	10,7%	25,5%	21,1%	10,3%	25,2%	29,0%
	Clase diam (cm)	Nuevo	Pérez-Cruzado (2011)	Glez-García (2013)			
<i>E. nitens</i>	<5	83,4%	41,1%	21,9%			
	5-10	59,6%	56,3%	133,7%			
	10-20	7,1%	18,0%	57,3%			
	30-30	4,0%	26,7%	30,9%			

Los nuevos modelos para la biomasa total por hectárea permiten la estimación de este parámetro – y por extensión de la capacidad de fijación de C atmosférico – en función de la edad de plantación y/o la densidad, parámetros que junto con la superficie de la finca son en muchas ocasiones los únicos conocidos por parte de la Administración. La capacidad predictiva de estos modelos no alcanza la de los propuestos por Pérez-Cruzado et al. (2011), pero hay que tener en cuenta que estos últimos incluyen como explicativas distintos atributos de la masa, tales como el diámetro medio cuadrático o la altura dominante, que requieren de la realización de un inventario. Los modelos ajustados indican el mayor potencial de crecimiento de *E. nitens*, que a los 10 años de edad de plantación alcanzan una biomasa seca total de 300 Mg ha⁻¹, lo que implica (asumiendo un contenido medio de C de 0,47) una cantidad de C fijado en torno a 140 Mg ha⁻¹, mientras que en el caso de *E. globulus* estos valores se reducen a aproximadamente 200 y 90 Mg ha⁻¹. Estas diferencias se deben al mayor potencial de crecimiento de biomasa en los 5 primeros años, que en el caso de *nitens* es de 15 Mg M.S. ha⁻¹año⁻¹, y en *globulus* se sitúa en torno a 6 Mg M.S. ha⁻¹año⁻¹. Estas diferencias van atenuándose entre los 5 y 10 años, con crecimientos anuales de 45 y 30 Mg M.S. ha⁻¹año⁻¹ para *nitens* y *globulus* respectivamente. Los valores obtenidos para *E. globulus* se encuentran dentro del orden de magnitud propuesto para la especie en trabajos previos (Pérez-Cruzado et al. 2011, Herrero et al. 2013), mientras que los de *nitens* son superiores a los propuestos por Pérez-Cruzado et al. (2011), lo que podría deberse a que en la última década *E. nitens* está sustituyendo a *globulus* en zonas climáticas óptimas, no estando relegada la especie a zonas de interior.

Los modelos de distribución de biomasa individual permiten determinar, a partir de la biomasa del árbol medio, el reparto de la biomasa total entre los distintos pies que componen la plantación. Nuevamente se comprueba el mayor crecimiento potencial de *E. nitens*. Sin embargo, es reseñable el hecho de que *E. globulus* presenta una distribución de las biomásas individuales más homogénea, con mucha menor variabilidad individual, y centrada en torno al valor medio, mientras que *E. nitens* muestra en la misma parcela gran variabilidad de tamaños, con pies suprimidos o de escaso desarrollo. Esto puede venir motivado por el hecho de que las plantaciones de *E. globulus* sean normalmente monoclonales, lo que un sucede en *nitens*.

Tanto las ecuaciones de biomasa fijada por ha plantada como los modelos de distribución de biomasa individual han sido ajustados a partir de una muestra de pequeño tamaño, por lo que deben de ser considerados preliminares. Los siguientes pasos en esta línea de trabajo será incluir en la base de datos parcelas de inventario de la red de seguimiento que ENCE tiene en las plantaciones que gestiona. De esta forma se permitirá ampliar el rango de validez de los modelos, y el desarrollo de otras herramientas adicionales, como son los factores de expansión de la biomasa (BEF), que faciliten la cuantificación de la capacidad fijadora de C por parte de las plantaciones de eucalipto.

6. Agradecimientos

El trabajo ha sido realizado en el marco de la Encomienda de Gestión EG-17-042.C2.2. entre el INIA y el MITECORD y del proyecto IMP-2018-004-C2.2. Los autores quieren agradecer al personal de técnico de ENCE y de la empresa TECSEMA su ayuda en la realización de los muestreos.

7. Bibliografía

- ALVAREZ-GONZALEZ, J. G.; BALBOA, M. A.; MERINO, A.; RODRIGUEZ SOALLEIRO, R. 2005. Estimación de la biomasa arborea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Recursos Rurais. 1, 1: 21-30
- CALAMA, R.; MADRIGAL, G.; LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; PARDOS, M.; ROBLA, E.; GONZÁLEZ-ABADÍAS, E.; MENÉNDEZ-MIGUELEZ, M. 2021. Estimación de biomasa acumulada y carbono fijado por las repoblaciones jóvenes. Montes 143, 53-55

CALVO DE ANTA, R.M.; MACÍAS, F.; RIGUEIRO, R.; SILVA-PANDO, F.J. 2019. El Eucalipto en Galicia: aspectos ambientales y socioeconómicos relevantes. Informe COSE (disponible on line: http://clustermadeira.com/wp-content/uploads/2017/01/Informe-eucalipto-Galicia_ES.pdf)

CAO, Q.V. 2004. Predicting Parameters of a Weibull Function for Modeling Diameter Distribution. *Forest Science* 50(5): 682-685

CHAZDON, R.; BRANCALION, P. 2019. Restoring forests as a means to many ends. *Science* (80). 364, 24–25. <https://doi.org/10.1126/science.aax9539>

GARCÍA-VILLABRILLE, J.D.; CRECENTE-CAMPO, F.; PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; DIEGUEZ-ARANDA, U.; ROJO-ALBORECA, A. 2014. Biomass and carbon content in Galicia (NW Spain) *Eucalyptus globulus* Labill. *Stands. Recursos Rurais* 10: 45-52

GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; HEVIA, A.; MAJADA, J.; BARRIO-ANTA, M. 2013. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and bioenergy* 54: 147-157

HERRERO, C.; JUEZ, L.; TEJEDOR, C.; PANDO, V.; BRAVO, F. 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and bioenergy* 67:212–222

MARM. 2011. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia. Edita Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. 55 pp

MENÉNDEZ-MIGUELEZ, M.; RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; CALAMA, R. 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal Forest Research* 140(12). DOI: 10.1007/s10342-021-01354-3

MERINO, A.; BALBOA, M.A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fastgrowing forest plantations in southern Europe. *For Ecol Manage* 207: 325–339

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *Monografías INIA, Serie Forestal*, nº 13.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. 2011. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass and Bioenergy* 35: 2839-2851

REED, D.D.; GREEN, E.J. 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Canadian Journal of Forest Research* 15(6): 1184-1187

ROBLA, E.; GONZÁLEZ, A.I. 2018. La importancia de las tierras forestales en el nuevo Reglamento LULUCF de la Unión Europea. *Montes* 134: 10-15

WARING, B.; NEUMANN, M.; PRENTICE, I.C.; ADAMS, M.; SMITH, P.; SIEGERT, M. 2020. Forests and Decarbonization – Roles of Natural and Planted Forests. *Front. For. Glob. Chang.* 3, 1–6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00058>

VEGA-NIEVA, D.J.; VALERO, E; PICOS, J.; JIMÉNEZ, E. 2015. Modeling the above and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. *Annals of Forest Science* 72: 967–980.