

ESTABLECIMIENTO DE UNA RED EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL CRECIMIENTO Y LA PRODUCCIÓN DE *Eucalyptus globulus* LABILL. EN EL NO DE ESPAÑA METODOLOGÍA Y PRIMEROS RESULTADOS

García-Villabrille, Juan Daniel⁸; Pérez-Cruzado, César⁹; Crecente-Campo, Felipe¹; Rodríguez-Soalleiro, Roque¹⁰; Diéguez-Aranda, Ulises¹; Rojo-Alboreca, Alberto¹

RESUMEN

En este estudio es presentada una red de parcelas semipermanentes para el estudio del crecimiento y la producción de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. del NO de España (Galicia y Asturias), instalada por la "Unidade de Xestión Forestal Sostible" (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela. Esta red busca representar adecuadamente las posibles combinaciones de edad, calidad de estación y densidad existentes en la región, así como diferenciar entre las plantaciones clonales y no clonales, y entre primeros y sucesivos turnos.

Con esta red se pretende obtener, en un plazo de tiempo lo más corto posible, información adecuada y suficiente para elaborar o actualizar herramientas selvícolas de apoyo a la toma de decisiones como curvas de calidad de estación, tablas de producción, diagramas de manejo de la densidad o modelos dinámicos de rodal, tarifas de cubicación con clasificación de productos, tarifas de biomasa o de contenido en carbono. Dichas herramientas se implementarán en programas informáticos de sencillo manejo (GesMO[®]), que facilitarán la simulación de tratamientos selvícolas y el uso de los modelos para la gestión sostenible de estas plantaciones.

Actualmente la base de datos está formada por 164 parcelas en total, de las cuales 115 corresponden a plantaciones de brinzales (primer turno), en las que se está centrando el trabajo, 13 a plantaciones de chirpiales (segundos turnos) y 36 a masas clonales (principalmente de los clones Anselmo y Odiel).

En todas las parcelas se está realizando un segundo inventario. En este trabajo se describe la metodología utilizada para la selección, instalación e inventario de las parcelas.

Como resultados iniciales de las mediciones en la red se presenta ecuaciones de cubicación de rodal y de biomasa de árbol individual, y se discute la necesidad de distinguir entre primeros y segundos turnos y entre masas clonales y no clonales.

Palabras clave: Eucalipto azul, volumen, biomasa

⁸ Unidade de Xestión Forestal Sostible. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior (Universidad de Santiago de Compostela), Campus universitario s/n, 27002 Lugo, España. juandaniel.garcia@usc.es; felipe.crecente@usc.es; ulises.dieguez@usc.es; alberto.rojo@usc.es.

⁹ Forest Inventory and Remote Sensing. Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology. Burckhardt-Institute (Georg-August-University Göttingen), Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, Alemania. cepecruzado@gmail.com

¹⁰ Unidade de Xestión Forestal Sostible. Departamento de Producción Vegetal. Escuela Politécnica Superior (Universidad de Santiago de Compostela), Campus universitario s/n, 27002 Lugo, España. roque.rodriguez@usc.es

SUMMARY

This work presents a semi-permanent sample plot network for the study of growth and yield of *Eucalyptus globulus* Labill. plantations in the NW of Spain (Galicia and Asturias), installed by the "Unidade de Xestión Forestal Sostible" (UXFS) (in English: Sustainable Management Forest Unit) of the University of Santiago of Compostela. This network was created in order to represent adequately the possible combinations of age, site quality and stand density in the region, as well as to make different sampling groups between clonal and non-clonal plantations, and between first and successive rotations.

The objective of the network is to collect, within the shortest possible time, sufficient and adequate information to develop or update silvicultural tools to support decision making, like site quality curves, yield tables, stand density management diagrams, dynamic stand growth models, volume equations with product classification, biomass and carbon content equations, etc. All these tools will be implemented in easy-to-use software (GesMO[®]), which will allow the simulation of silvicultural treatments and the use of models to achieve sustainable management for the plantations.

The network has currently 164 plots, 115 are seedling plots (first rotation), 13 are coppice plots (second rotation) and 36 are clonal plots.

In all plots a second inventory is being carried out. The paper describes the methodology used for the selection, installation and inventory of the plots.

As initial results, stand volume and individual biomass equations are presented. The need to separate between first and second rotation and between clonal and non-clonal stands is also discussed.

Key words: Blue gum, volume, biomass

INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus*, que incluye casi 600 taxones originarios en su mayoría de Australia (Chippendale, 1988), es uno de los más ampliamente extendidos por todo el mundo debido a la importancia productiva de sus plantaciones, ocupando más de 20 millones de hectáreas en el año 2009 (Iglesias-Trabado *et al.*, 2009). Según esa misma fuente, en España hay unas 640.000 ha de eucaliptales, estando representadas cerca de 80 especies del género (De la Lama, 1976), y siendo *Eucalyptus globulus* Labill. la más importante por su extensión superficial y su producción, cuyas plantaciones cubren más de 400.000 ha en el N y NO de España. La mayoría de esas plantaciones se encuentran en Galicia (principalmente en las provincias de A Coruña y Lugo), donde *E. globulus* es una de las especies forestales con mayor representación superficial, ocupando 287.983,79 ha en masas puras (incluyendo una pequeña proporción de *E. nitens* H. Deane & Maiden en Lugo y de *E. viminalis* Labill. en Pontevedra) y 145.932,05 ha en masas mezcladas, principalmente con *Pinus pinaster* Ait. y *Quercus robur* L. (MMAMRM, 2011).

Además, *E. globulus* es la especie de mayor importancia económica, con un volumen de corta anual superior al millón de metros cúbicos en el período 1994-2002, superando al volumen medio cortado anualmente de coníferas, que no llegó a 900.000 m³ en ese mismo período (Xunta de Galicia, 2002). La importancia de esta especie de eucalipto se acentúa si se considera que es la principal productora de pasta de celulosa de fibra corta (la de mayor calidad) de toda la Unión Europea, siendo España y Portugal los principales productores de BEKP (*bleached eucalypt kraft pulp*). Conviene recordar que la madera (y sus derivados) son el segundo producto más deficitario e importado en la Unión Europea después de los energéticos (petróleo y gas natural).

A pesar de la importancia económica de *Eucalyptus globulus*, y de que se conoce bastante bien su silvicultura (Ruiz *et al.*, 2008; González-Río *et al.*, 1997), hay un déficit de modelos de crecimiento o tablas de producción en España para la especie. Dichas herramientas resultan imprescindibles para la planificación forestal, ya que permiten simular diferentes alternativas selvícolas, estimar la producción y fundamentar la toma de decisiones en procesos de optimización económica, lo que facilita la selección del mejor tratamiento en cada caso.

Los trabajos desarrollados en España hasta ahora son modelos estáticos (tablas de producción) elaborados para Galicia por Fernández López (1982, 1985) y recopilados en Madrigal *et al.* (1999). Dados los profundos cambios en los métodos de repoblación y aprovechamiento, así como en los marcos de plantación y en la mejora genética de la especie durante las últimas décadas, dichos modelos presentan una dudosa validez para su aplicación actual. García y Ruiz (2003) desarrollaron un modelo dinámico, pero los propios autores indican ciertas deficiencias en el modelo ya que los datos utilizados solo pertenecían a parcelas de chirpiales de primer brote, de tamaño reducido (200 m²), no diseñadas inicialmente para modelización, y los datos recogidos eran de baja calidad. Más recientemente, Pérez-Cruzado *et al.* (2011) desarrollaron unos modelos estáticos para la especie con inclusión de variables de producción energética, aunque sin distinguir en cuanto al material de partida.

Existen otros trabajos que cubren parcialmente diferentes aspectos de la producción, pero ninguno dispone de datos que cubran toda el área de extensión de la especie. Estos trabajos son una relación altura-diámetro generalizada, una herramienta de cubicación de árbol individual con y sin clasificación de productos (Sánchez *et al.*, 2004), una ecuación de cubicación y otra de estimación del diámetro a partir de las dimensiones del tocón, y ecuaciones de biomasa y de contenido en carbono (Brañas *et al.*, 2000a, 2000b; Balboa-Murias, 2005), todos ellos recogidos en Diéguez-Aranda *et al.* (2009).

Dada la importancia económica de *Eucalyptus globulus* y teniendo en cuenta la falta de herramientas de apoyo a la gestión y la planificación, queda justificada la necesidad de elaborar modelos operativos para esta especie en el NO de España, y para ello se solicitó en 2010 una ayuda al Ministerio de Ciencia e Innovación para la realización del proyecto de investigación "Modelización del crecimiento y la producción en plantaciones de brinzales de *Eucalyptus globulus* Labill. del NO de España". Dicho proyecto fue aprobado (código AGL2010-22308-C02-01), con una financiación de la Unión Europea mediante fondos FEDER, para un período de tres años (2011 a 2013).

El objetivo fundamental de este trabajo es describir la metodología seguida en la instalación de una red de parcelas apta para el estudio del crecimiento y la producción de *Eucalyptus globulus* en el NO de España, dentro del mencionado proyecto de investigación, así como la metodología de toma de datos en el inventario y en árboles tipo. Además se presenta los resultados iniciales (provisionales) para tarifas de cubicación y ecuaciones de biomasa.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de Estudio

La red de parcelas instalada se extiende por todo el área de distribución de *Eucalyptus globulus* en Galicia (NO de España), coincidente con una franja de unos 45-50 km desde el litoral hacia el interior, con altitudes comprendidas entre el nivel del mar y un máximo de 600 msnm. Con el fin de desarrollar modelos de gran representatividad, fue necesario cubrir una gran variedad de combinaciones respecto a edades, calidades y densidades, diferenciando entre plantaciones clonales y no clonales, y dentro de éstas últimas entre brinzales (primera plantación) y chirpiales (rebrote), así como entre el material geológico de partida, que puede ser clasificado en dos grandes grupos en función del comportamiento de la especie en la zona de estudio (granitos y esquistos), si bien hay una pequeña representación sobre cuarzoesquistos y sobre rocas básicas. En el caso de las plantaciones clonales no se distinguió entre primera plantación y rebrote, pues actualmente la mayoría de las mismas en el NO de España son muy jóvenes y no han llegado al primer turno de corta.

Otro aspecto importante es el uso previo del suelo, habiendo una alta proporción de parcelas instaladas en terrenos forestales frente a los de anterior carácter agrícola. Esto es representativo de la realidad de las plantaciones gallegas, ya que se ha producido un cambio reciente en los usos del suelo motivado principalmente por el abandono de las labores agrícolas y por un mayor conocimiento de la rentabilidad de la especie, sobre todo en el norte de la región (provincias de Lugo y La Coruña).

Para la localización de los sitios de muestreo se contó con el apoyo de diferentes asociaciones y empresas forestales de toda la región, cubriendo así otro aspecto importante como es el mercado. La mayor parte de las parcelas se instaló en montes que pertenecen o están gestionados por la empresa ENCE (Energía y Celulosa), o en plantaciones de propietarios privados asociados, cuyo destino, mayoritariamente, es dicha empresa de celulosa. Se trata de una zona donde predominan propiedades particulares de pequeño tamaño, con superficies medias inferiores a 0,35 ha, por lo que se añade una dificultad en la localización de rodales adecuados como se explica en el epígrafe siguiente. Otra parte de la muestra, con menor representación, cubre la otra parte del mercado (minoritaria) que aprovecha la madera para la elaboración de tableros de fibras, postes, laminados, etc.

Prospección de Campo

Una vez analizada la zona de estudio, se realizó visitas de campo con la información aportada por las entidades colaboradoras en el proyecto. En esta fase se determinó la posibilidad de instalar o no una parcela en un rodal concreto. Los aspectos más importantes de cara a la instalación de parcelas fueron: i) Poder levantar una parcela de al menos 500 m², que permitiera evitar el efecto borde en todo su contorno, dejando una distancia mayor o igual a 15 m hasta el borde del rodal; ii) Tener la certeza de que será viable realizar, al menos, un segundo inventario; iii) Que la parcela fuera representativa del rodal respecto a diámetros, alturas, número de marras, densidad, estado sanitario y deformaciones en el fuste; iv) Conocer su edad exacta; y v) De una forma menos restrictiva, tener la posibilidad de apeaar árboles tipo en las inmediaciones de la parcela, o bien en zonas de aprovechamiento cercanas de edad conocida.

Con la visita de campo se hizo una primera estimación de la altura dominante del rodal, para lo que se midió la altura de 3-4 árboles dominantes con hipsómetro Vertex IV. De esta forma se pudo tener una primera estimación del índice de sitio a partir del modelo disponible hasta la

fecha (García y Ruiz, 2003), a pesar de que presenta ciertas deficiencias en estaciones de buena calidad.

Levantamiento de Parcelas e Inventario

Es la segunda fase de los trabajos de campo, que consistió en la instalación y medición de las parcelas que cumplían los requisitos anteriormente mencionados, el procedimiento seguido fue el que mantiene el grupo de investigación "Unidade de Xestión Forestal Sostible" (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, desde hace 15 años en las redes de otras especies estudiadas con anterioridad y que ha proporcionado buenos resultados. La metodología seguida para la instalación de parcelas de crecimiento y producción se describe en Diéguez-Aranda *et al.* (2009), y por otra parte la UXFS redacta protocolos de actuación según especies, que son actualizados en función de las experiencias adquiridas.

Las parcelas instaladas son rectangulares, de aproximadamente 25 m de lado en curva de nivel por 20 m en línea de máxima pendiente. Las esquinas se sitúan siempre en el cruce de dos calles de la plantación. El inventario dasométrico comienza siguiendo las filas de árboles en línea de máxima pendiente, quedando identificado cada árbol por una marca a la altura normal (1,3 m desde el suelo, aguas arriba) y un número correlativo, considerando las marras. La marca sobre los árboles se realiza con spray y no con chapas, debido a que éstas pueden dañar el cambium, produciendo formaciones de kino.

Los datos tomados para cada árbol son: i) Dos diámetros en cruz (precisión en mm) a la altura normal con forcípula milimetrada, uno en la dirección de la fila de árboles y otro perpendicular, evitando incluir la corteza desgajada del tronco sin desprenderse del mismo; ii) Altura total (precisión en dm) con hipsómetro digital; iii) Altura de copa viva (dm), considerando ésta como el punto donde se insertan ramas que forman parte de la copa de forma continua, y no las ramas aisladas por debajo de este punto; iv) Número de árbol y número de cepa, teniendo en cuenta las bifurcaciones por debajo de la altura normal y los chirpiales que, además de las parcelas propias de este tipo de plantaciones, también pueden aparecer en plantaciones de semilla o de clon donde el pie original queda dañado y es sustituido por brotes; v) Una serie de datos codificados por código binario (0,1) para identificar diferentes malformaciones del árbol: *R*, para evaluar la rectitud; *T*, para árboles inclinados; *B*, para árboles bifurcados; $C + (T \text{ o } R)$, para copa torcida o rota; y *PS*, para árboles con la punta seca.

Tras el inventario se añade información relativa a la parcela, cuya evaluación o medición mejora tras el inventario pie a pie, como marco de plantación, estado sanitario anormal, pedregosidad, daños por fauna salvaje, medidas de ayuda a los plantones, podas, deformaciones frecuentes, etc.

El segundo y sucesivos inventarios se está realizando transcurrido un año y con un margen de \pm una semana desde el primero, con el fin de obtener datos de calidad para el desarrollo de modelos dinámicos de crecimiento. Aunque habría sido más conveniente distanciar el segundo inventario del primero al menos dos o tres años, la necesidad de completar el trabajo, al menos provisionalmente, en el período para el que se cuenta con financiación, ha obligado a remedir las parcelas con solo un año de diferencia, aunque no se descarta realizar más de un segundo inventario de las mismas siempre que se puedan conseguir nuevos recursos. Por otra parte, y a pesar de las precauciones tomadas, unas pocas de las parcelas inventariadas en primer lugar han sido cortadas antes del segundo.

Árboles Tipo para Tarifas de Cubicación, de Biomasa y de Contenido en Carbono

Este proceso conlleva un muestreo destructivo, siendo el método más frecuente en la estimación de biomasa. Se cortan al menos 2-3 árboles tipo por parcela, pero nunca del interior de la parcela instalada, sino en las inmediaciones de la misma, y evitando el apeo de árboles de borde. Las dimensiones de dichos árboles estarán repartidas entre los tamaños existentes, para lo cual se selecciona un árbol dominante, uno intermedio y otro sumergido. Para facilitar la selección de los árboles tipo, antes del trabajo de campo se toman en consideración los diámetros y alturas

medios y dominantes de la parcela, y se hace un gráfico de distribuciones de los datos tomados en el inventario pie a pie con el fin de tener una visión correcta de las distribuciones diamétricas y de alturas, y de su relación.

Antes del apeo de cada árbol se realiza y anota las mediciones propias del inventario dasométrico para comprobar la validez de la elección, además del diámetro en la base (diámetro del tocón), medido siempre a la misma altura desde el suelo aguas arriba de la pendiente (8 cm).

Una vez apeado el árbol se divide el fuste en las trozas que serán pesadas, siendo la longitud seleccionada 1 metro, hasta un diámetro en punta delgada de 7 cm. De esta forma queda dividido el árbol en trozas de igual longitud, en las que se mide el diámetro en cruz y el espesor de la corteza en la base. También se anotan las alturas correspondientes a la primera rama viva, la primera rama muerta, la primera rama viva, la base de la copa continua, la altura para un diámetro de 7 cm y la altura total. Posteriormente se extrae una rodaja de unos 3-4 cm de altura en la base de cada troza, además de una última rodaja en la parte superior de la troza cuyo diámetro en punta delgada es menor o igual a 7 cm, siendo el número de rodajas igual al de trozas + 1. Estas rodajas se llevan a laboratorio para secar.

Los datos que se toma en campo se dividen en dos partes; la correspondiente al fuste (trozas) y la correspondiente a las distintas fracciones de ramas encontradas a lo largo del fuste y en la copa. Para cada troza se anota su longitud (m) y su peso verde con y sin rodaja (kg con precisión 20 g). Para la fracción de ramas se anota el número de la troza en que están insertadas o bien si pertenecen a la copa, el número de ramas, su estado (muertas o vivas) y su peso verde (kg) por trozas, separando en campo dos fracciones; las ramas gruesas con diámetros entre 2,5 y 7 cm, y las ramas finas con diámetro menor o igual de 2,5 cm. No conviene fraccionar más la muestra en campo ya que se pueden producir pérdidas de material, con el consiguiente error de medición. Cada fracción es pesada por separado y se toma un 20% del peso verde de cada una para ser llevada al laboratorio a secar.

Los datos que se toma en el laboratorio son los siguientes: diámetro en cruz de cada rodaja en su parte basal (cm), espesor de la corteza (cm), peso verde (en gramos con precisión 0,01 g) de la madera y la corteza por separado. Para la fracción de ramas se hace un segundo procesamiento de la muestra, en el que se separa las ramas más finas en tres fracciones y se las pesa en verde por separado: ramas con diámetro entre 2,5 y 0,6 cm (ramas finas), menores o iguales de 0,6 cm (ramillos) y las hojas incluyendo su pecíolo. Finalizado todo el procesamiento de rodajas y fracciones de ramas se procede a su secado en estufa a 105°, hasta peso constante o con una variación inferior al 1^o/₁₀, midiendo entonces el peso seco de todas las muestras.

Tarifas de Cubicación de Rodal

Uno de los primeros trabajos que se desarrolló a partir de la red de parcelas de eucalipto fue el desarrollo de ecuaciones de cubicación de rodal, dada la falta de este tipo de herramientas en la región de estudio. Hasta la fecha, para Galicia se contaba con tarifas de cubicación de árbol individual, con y sin clasificación de productos, para *Eucalyptus globulus* (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009), aunque los propios autores indican la necesidad de mejorar esos modelos ya que para su elaboración no se utilizó datos precedentes, entre otros, de rodales de la costa de la provincia de Lugo. Sin embargo, no existen tarifas de cubicación de rodal para la especie en Galicia, a pesar de que es una herramienta más sencilla de utilizar (aunque algo menos precisa) que las de árbol individual, ya que para su aplicación basta con conocer una o dos variables medias del rodal y no la distribución diamétrica o datos de árbol individual (como en el caso de las tarifas de árbol individual).

Las variables utilizadas son las mencionadas en el epígrafe de inventario: diámetro normal y altura total. Para la estimación del volumen total con corteza (m³) de cada parcela (V_{cc}) se utilizó el sistema compatible de cubicación de árboles individuales para la especie propuesto por Diéguez-Aranda *et al.* (2009). Dado que se trataba de ajustar una tarifa de rodal, se probaron y emplearon las siguientes variables de masa: N (número de árboles/ha), G (área basimétrica en m²/ha), H_0 (altura dominante en m) y t (edad en años). Para la elaboración de la tarifa de cubicación de rodal se evaluaron 10 modelos de dos y tres entradas basados en la expresión de Schumacher

& Hall (1933) o modelo alométrico, con y sin término independiente y otros cinco modelos de variable combinada. A su vez, se formaron grupos según el tipo de masa, desarrollando por tanto tres ecuaciones específicas, una para rodales de brinzal, otra para clonales y otra para chirpiales, así como una cuarta ecuación que no hace dicha distinción, denominada modelo global. A continuación se muestra los 15 modelos ensayados en este estudio:

$$V_1 = b_0 \cdot t^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \cdot N^{b_3} \quad [1]$$

$$V_2 = t^{b_0} \cdot H_0^{b_1} \cdot N^{b_2} \quad [2]$$

$$V_3 = b_0 + b_1 \cdot H_0 \cdot G \quad [3]$$

$$V_4 = b_0 \cdot G \cdot H_0 \quad [4]$$

$$V_5 = b_0 + G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \quad [5]$$

$$V_6 = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \quad [6]$$

$$V_7 = G^{b_0} \cdot H_0^{b_1} \quad [7]$$

$$V_8 = b_0 + G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \cdot t^{b_3} \quad [8]$$

$$V_9 = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \cdot t^{b_3} \quad [9]$$

$$V_{10} = G^{b_0} \cdot H_0^{b_1} \cdot t^{b_2} \quad [10]$$

$$V_{11} = b_0 \cdot G \cdot H_0 + G \quad [11]$$

$$V_{12} = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} + G^{b_3} \quad [12]$$

$$V_{13} = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} + b_3 \cdot G^{b_4} \quad [13]$$

$$V_{14} = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} + H_0^{b_3} \quad [14]$$

$$V_{15} = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot H_0^{b_2} + b_3 \cdot H_0^{b_4} \quad [15]$$

Para el ajuste estadístico de los modelos se empleó la función “nls” (*nonlinear least squares*) del software R (R Core Team, 2012). Para la comparación de modelos se empleó el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), el estadístico raíz del error medio cuadrático (*RMSE*), y el sesgo (*BIAS*), cuyas expresiones son:

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \bar{Y})^2} \cdot \frac{n - q}{n - p} \quad [16]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad [17]$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad [18]$$

Donde:

Y_i , \hat{Y}_i e \bar{Y} son los valores observados, predichos y promedio de la variable dependiente

n es el número total de observaciones

q es el número de términos independientes del modelo

p es el número de parámetros a estimar

[Un problema habitual en el proceso de ajuste de tarifas de cubicación es la presencia de heterocedasticidad, que se identifica gráficamente por la falta de homogeneidad en la varianza de los residuos obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Se ajustó un modelo de los residuos con la variable dependiente, antes y después de la regresión ponderada, con el fin de comprobar la necesidad de corrección de la heterocedasticidad, que se manifiesta cuando este ajuste es significativo. Esta situación se puede corregir transformando las variables (tomando logaritmos en ambos términos de la expresión), o mediante regresión ponderada (Parresol, 1999).

En este caso se optó por emplear regresión ponderada, para lo cual se asoció a cada observación un peso igual a la inversa de la varianza de su error, $1/\sigma^2$, durante el proceso de ajuste. Siguiendo a Neter *et al.* (1996), se empleó una función potencial del tipo:

$$\sigma_i^2 = X_i^k \quad [19]$$

donde se debe determinar el valor del exponente k . Para ello se utilizó la metodología propuesta por Park (1966), que consiste en emplear los errores del modelo ajustado sin pesos, $\hat{\epsilon}_i$, como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error, es decir:

$$\hat{\epsilon}_i^2 = \gamma \cdot X_i^k \quad [20]$$

o bien:

$$\text{Ln}\hat{\epsilon}_i^2 = \text{Ln}\gamma + k \cdot \text{Ln}X_i \quad [21]$$

donde γ es una constante y la variable X toma diferentes valores en función del modelo de tarifa usado, por ejemplo: G^k , H_0^k , $G \cdot H_0^k$, N^k .

Tarifas de Biomasa

La biomasa acumulada en las masas forestales, en sus distintas formas, es importante debido a sus usos comerciales (pulpa y bioenergía), a que constituye un aporte de nutrientes a la propia masa durante su turno, y a que contribuye a evaluar el ciclo del carbono o el riesgo de incendio (Parresol, 1999). Estas razones motivan el desarrollo de unas ecuaciones de biomasa, que para este trabajo se realizó a partir de una muestra parcial de la red de parcelas, siendo los árboles utilizados procedentes de plantaciones de primer turno (brinza).

Dentro del contexto de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* destinadas a celulosa, existen dos destinos fundamentales para las distintas partes del árbol; por un lado la madera es aprovechada para producir pasta de papel, y por otro la corteza, junto con las ramas y la copa, sirven para generar bioenergía. Atendiendo a la propia división del árbol hecha por la industria, y con el fin de poner a disposición de los interesados herramientas prácticas, se desarrolló cuatro ecuaciones según un modelo alométrico para la estimación de biomasa (kg): i) Biomasa total (W) para el árbol entero; ii) Biomasa de fracciones (Wfr), que incluye las ramas completas a lo largo del fuste y las que forman parte de la copa cuyo diámetro con corteza es menor de 7 cm; iii) Biomasa de madera (Wma), para la madera del fuste y las ramas cuyo diámetro con corteza es mayor o igual a 7 cm en el fuste; y iv) Biomasa de corteza (Wco), para la corteza del fuste y de las ramas gruesas. A continuación se muestra los modelos evaluados:

$$W = b_0 \cdot d^{b_1} \quad [22]$$

$$W = d^{b_0} \quad [23]$$

$$W = b_0 \cdot d^{b_1} \cdot h^{b_2} \quad [24]$$

$$W = d^{b_0} \cdot h^{b_1} \quad [25]$$

Un problema frecuente en el ajuste de los modelos de biomasa, al igual que en el caso de las tarifas de cubicación, es la presencia de heterocedasticidad. Para corregir este fenómeno se recurrió de nuevo a la regresión ponderada, utilizando en este caso factores de ponderación que contienen variables de árbol individual tales como $1/d^k$, $1/h^k$, $1/dh^k$ y $1/(d^2h)^k$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Red de Parcelas

En la Figura N° 1 se muestra la localización de la red de 164 parcelas instaladas, de las cuales 115 corresponden a plantaciones de brinzales (primera plantación no clonal), en las que se está centrando el trabajo, 13 a plantaciones de chirpiales (rebrote no clonal) y 36 a masas clonales, principalmente de los clones Anselmo y Odiel. El clon Anselmo representa a la generación de mejora F0, por tanto a árboles plus seleccionados directamente en monte y recepados para propagar por estaquilla, mientras que Odiel es un clon F1, procedente del cruce de individuos de la generación F0.

En el Cuadro N° 1 se muestra los principales datos del número de cepas y árboles encontrados en las parcelas, y de su superficie. Puede observarse una gran homogeneidad, probablemente dada por el protocolo de levantamiento de las mismas, y cabe resaltar que la densidad en los chirpiales es superior a la debida, habiendo mayor número de árboles que de cepas, no siendo aconsejable superar la densidad inicial de plantación (González-Río *et al.*, 1997).

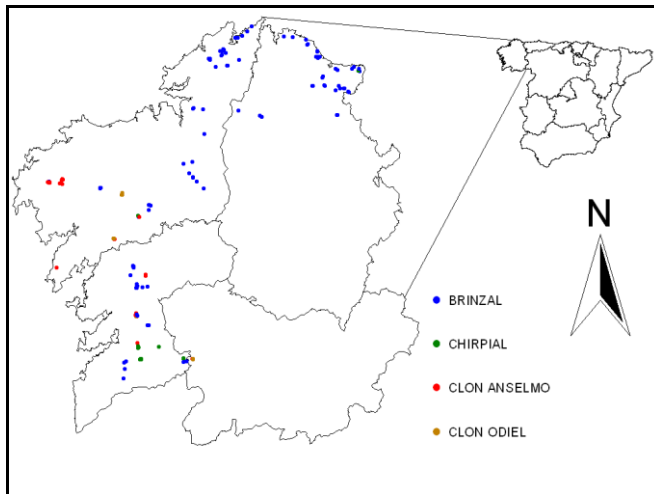


Figura N° 1
LOCALIZACIÓN DE LA RED DE PARCELAS

Cuadro N° 1
DATOS DESCRIPTIVOS DE LAS PARCELAS

Brinzal	Cepas	Árboles	Superficie
Media	66	67	0,051
Máximo	137	144	0,059
Mínimo	37	38	0,024
Desv. típica	16	17	0,007
Chirpial	Cepas	Árboles	Superficie
Media	55	65	0,052
Máximo	80	100	0,064
Mínimo	30	31	0,050
Desv. típica	16	18	0,004
Clonal	Cepas	Árboles	Superficie
Media	62	63	0,052
Máximo	79	84	0,058
Mínimo	38	39	0,048
Desv. típica	12	12	0,002

En el Cuadro N° 2 se muestra los estadísticos descriptivos de las principales variables de rodal medidas en las parcelas. Puede observarse, asumiendo que la red de parcelas es representativa del entorno, que se corrobora que la selvicultura clonal está aún en una fase temprana, siendo su edad media de 7 años, y en general todavía sin rebrote. Evaluando los crecimientos diametrales y en altura medios para cada grupo, se observa una mayor tasa en las masas clonales, como sería esperable, al haberse considerado el crecimiento como un carácter importante de selección (Toval, 2008).

Cuadro N° 2
VARIABLES DE RODAL DE LAS PARCELAS SEGÚN MATERIALES DE REPRODUCCIÓN

Brinzal	t	d	D₀	h	H₀	N₀	N₁	G₁
Media	11,6	11,2	22,1	13,2	20,3	1328	1228	18,79
Máximo	40,0	22,1	54,4	26,9	39,5	2573	2387	61,70
Mínimo	1,0	1,2	2,3	2,0	3,1	720	661	0,15
Desv. típica	5,4	3,9	8,2	4,9	7,6	397	405	10,33
Chirpial	t	d	D₀	h	H₀	N₀	N₁	G₁
Media	12,1	11,6	22,0	14,1	21,2	1059	1181	16,13
Máximo	21,0	19,1	27,6	20,5	29,2	1538	2000	21,78
Mínimo	6,0	7,8	13,0	8,2	12,0	595	595	7,80
Desv. típica	4,0	3,0	4,3	3,8	5,3	293	389	4,34
Clonal	t	d	D₀	h	H₀	N₀	N₁	G₁
Media	6,5	9,9	15,7	10,9	14,7	1190	1114	11,37
Máximo	11,0	16,0	25,0	16,8	23,9	1560	1540	19,76
Mínimo	4,0	4,6	8,2	5,0	7,6	760	780	3,45
Desv. típica	1,7	2,8	3,8	3,3	3,9	212	211	4,69

- t: Edad (años)
d: Diámetro medio del rodal (cm)
D₀: Diámetro dominante (cm) (correspondiente a los 100 árboles más gruesos por ha)
h: Altura media del rodal (m)
H₀: Altura dominante (m) (correspondiente a los 100 árboles más gruesos por ha)
N₀: Densidad de plantación (árboles/ha)
N₁: Densidad en el primer inventario (árboles/ha)
G₁: Área basimétrica del rodal en el primer inventario (m²/ha).

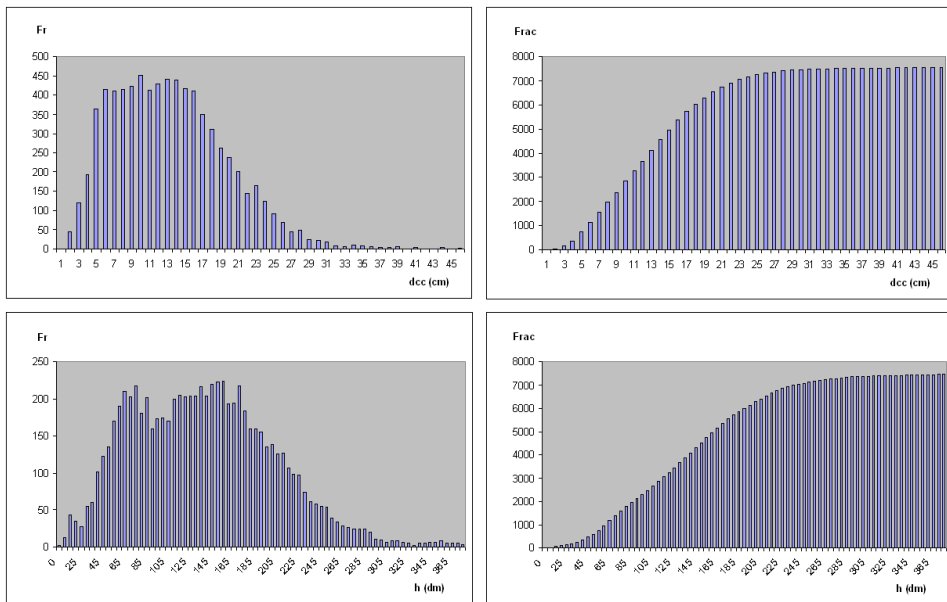
En la Figura N° 2 se muestra las distribuciones diamétricas y de alturas para toda la muestra. Debido a que se trata de una especie de turno corto que no suele superar los 20 años, las distribuciones están desplazadas hacia la izquierda.

Además, se observa una tendencia a dos máximos en las curvas (mejor en la de alturas), lo que puede ser indicativo de una distribución bimodal causada por la representación conjunta de las masas de brinzal y chirpial (muy parecidas entre sí) con las masas clonales (más jóvenes).

Por otra parte, en las plantaciones que se encuentran por encima de los 25 años es posible encontrar un segundo piso procedente del regenerado, por lo que se debe tener precaución en la toma de datos, identificando si un árbol pertenece o no a esta clase. Además, este piso está sometido a la competencia que ejerce sobre él la masa adulta, por lo que su crecimiento no será óptimo.

La posibilidad de contar con datos de parcelas con edades superiores al turno puede servir para determinar los niveles asintóticos en cuanto al crecimiento, aunque es raro encontrar este tipo de rodales y su selvicultura puede no ser representativa de una situación actual.

Otra importante cuestión a reseñar es la dificultad para encontrar rodales de elevada edad y buena calidad de estación, problema común en la mayoría de estudios de crecimiento y producción de especies forestales (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).



dcc: Diámetro normal con corteza (cm) h: Altura total (m)
 Fr: Frecuencia absoluta Frac: Frecuencia acumulada.

Figura N° 2
DISTRIBUCIONES DE DIÁMETROS Y ALTURAS PARA LA MUESTRA COMPLETA

Árboles Tipo

En el Cuadro N° 3 se muestra un resumen de las principales variables de los 47 árboles tipo muestreados hasta el momento (octubre de 2012) para la elaboración de tarifas de cubicación, de biomasa y de contenido en carbono.

Cuadro N° 3
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE LOS ÁRBOLES TIPO MUESTREADOS
(hasta octubre de 2012)

	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>Wco</i>	<i>Wma</i>	<i>Wrg</i>	<i>Wrf</i>	<i>Wr</i>	<i>Wh</i>
Media	14,7	16,1	10,27	71,41	4,54	3,22	1,60	5,86
Máximo	31,0	26,2	44,80	366,90	21,70	12,60	9,00	37,80
Mínimo	2,4	4,0	0,30	1,12	0,00	0,13	0,07	0,18
Desv. típica	5,6	5,5	9,90	74,24	5,58	2,74	1,89	7,39

d: Diámetro normal (cm)
h: Altura total (m)
Wco: Biomasa de corteza (kg)
Wma: Biomasa de madera (kg)
Wrg: Biomasa de ramas gruesas (kg)
Wrf: Biomasa de ramas finas (kg)
Wr: Biomasa de ramillos (kg)
Wh: Biomasa de hojas (kg).

Tarifas de Cubicación

En el Cuadro N° 4 se muestran los estadísticos del ajuste para cada uno de los tipos de plantaciones y para todos en conjunto (global). Las variables mejor relacionadas con el volumen

fueron siempre el área basimétrica y la altura dominante, aunque en función del tipo de masa (brinzal, chirpial, clon) la relación es distinta. Mientras las masas de chirpial se pudieron modelizar utilizando un solo factor que actúa como un coeficiente mórfico referido a una sección fija (modelo [4]), las masas de brinzal y de clones presentaron una relación de tipo alométrico.

Cuadro N° 4
PARÁMETROS OBTENIDOS DEL AJUSTE NO LINEAL Y ESTADÍSTICOS
PARA LOS MODELOS ANALIZADOS

Modelo Seleccionado	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2_{Aj}	RMSE	BIAS
Global [12]	0,11641 (***)	0,68941 (***)	1,51368 (***)	1,4077 (***)	0,9942	13,71	-0,2782
Brinzal [12]	0,13313 (**)	0,72329 (***)	1,4479 (***)	1,3924 (***)	0,9937	15,72	-0,3298
Clonal [9]	0,53814 (***)	1,1065 (***)	0,71645 (***)	0,11172 (0,0136)	0,9785	6,29	0,0128
Chirpial [4]	0,3845 (***)	-	-	-	0,9839	7,13	-0,0344

En cada casilla el valor superior corresponde al valor del parámetro ajustado y entre paréntesis el nivel de significación del parámetro.

Los números entre corchetes corresponden al modelo (ecuación) elegido para cada tipo de masa.

El modelo [12] de variable combinada, que fue el mejor para las tarifas global y de brinzal, puede carecer de sentido dimensional al introducir un término en unidades diferentes a las de la variable dependiente, si bien poseen sentido biológico al no producir salidas cuando $G=0$ y $H_0=0$.

El segundo mejor modelo para esas tarifas global y de brinzal fue el [9] (que, por otra parte, fue el elegido para la tarifa de rodales clonales), en el que se introduce la edad, aunque hay que tener en cuenta que en estos casos la significación fue baja ($p<0,1$) y la regresión ponderada no mejoró el ajuste.

Tarifas de Biomasa

En el Cuadro N° 5 se muestra los estadísticos del ajuste para cada una de las partes del árbol consideradas, siendo en todos los casos el mejor modelo el que relaciona la biomasa con el diámetro y la altura [24].

Los mejores ajustes correspondieron a las ecuaciones de biomasa total (Wt) y de biomasa de madera (Wma), mientras resulta más difícil de modelizar la corteza (Wco) y el conjunto de las fracciones menores de 7 cm (Wfr).

Respecto a la corteza, puede que su ajuste se vea influido por la dispersión de los datos generada por el diámetro del tocón cuando se comparan árboles sumergidos con árboles dominantes, como se puede ver en la Figura N° 3.

En el caso de las fracciones, está probado que la inclusión de otras magnitudes como el diámetro en la base de la copa mejoran los resultados del ajuste de su biomasa, algo que también ha sido demostrado para especies del género *Eucalyptus* (António *et al.*, 2007; Pérez-Cruzado *et al.*, 2011).

La biomasa total y de fracciones hace que se compensen los errores propiciados por la heterogeneidad de la copa y por el error acumulado que supone la separación en cuatro fracciones.

Cuadro N° 5
PARÁMETROS OBTENIDOS DEL AJUSTE NO LINEAL
Y ESTADÍSTICOS PARA LOS MODELOS ANALIZADOS

Modelo Seleccionado	b_0	b_1	b_2	R^2_{Aj}	RMSE	BIAS
<i>Wt</i> [24]	0,01990 (***)	1,99956 (***)	1,00657 (***)	0,9787	14,25	0,0264
<i>Wfr</i> [24]	0,01872 (0,0881)	2,76699 (***)	-0,35384 (0,3538)	0,8304	6,56	0,0062
<i>Wco</i> [24]	0,007422 (**)	1,89977 (***)	0,67890 (**)	0,8958	3,16	0,1096
<i>Wma</i> [24]	0,008589 (***)	1,84124 (***)	1,34118 (***)	0,9905	7,16	0,0067

Wt: Biomasa total (kg)

Wfr: Biomasa de las fracciones menores de 7 cm (kg)

Wco: Biomasa de corteza (kg)

Wma: Biomasa de madera (kg).

En cada casilla el valor superior corresponde al valor del parámetro ajustado y entre paréntesis el nivel de significación del parámetro.

Los números entre corchetes corresponden al modelo (ecuación) elegido para cada fracción del árbol.

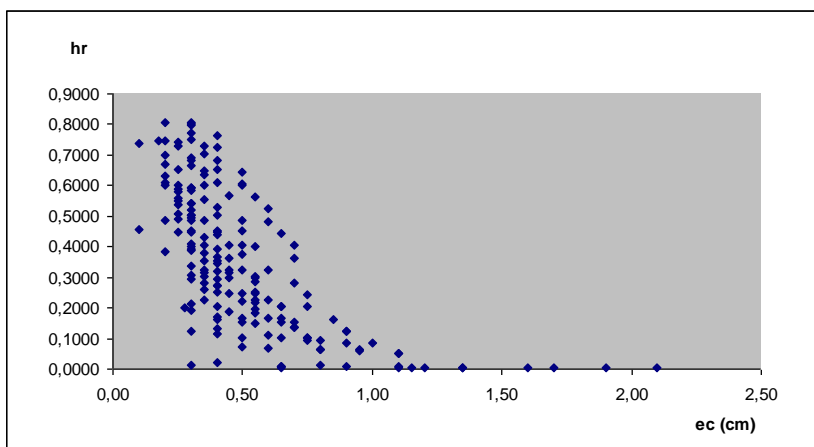


Figura n° 3
ALTURA RELATIVA (hr) FRENTE A ESPESOR DE CORTEZA (ec)

Las ecuaciones desarrolladas mejoran las existentes (Brañas *et al.*, 2000a) para la biomasa de madera en el fuste, y para las fracciones menores de 7 cm. Probablemente esto sea motivado por el pesaje completo del tronco y la recolección de rodajas a lo largo del fuste, lo que implica menores errores en el cálculo de la humedad de la troza, y por el procesado de la muestra realizado en campo para estimar las fracciones de ramas y copa por tamaños.

El pesaje y medición de cada troza, junto con la recolección de rodajas en altura, permite el desarrollo de dos metodologías distintas en el ajuste de modelos. Por un lado se puede ajustar ecuaciones que relacionen el diámetro y/o la altura con la variable modelizada, como el caso desarrollado, o bien se puede ajustar un modelo de densidad básica en altura unido a una función de perfil. Otra característica deseable en las estimaciones de biomasa sería la aditividad del sistema de ecuaciones que modelizan cada fracción, ocurriendo de igual manera para las partes del fuste (madera y corteza), y por consiguiente para la biomasa total.

CONCLUSIONES

Como ocurre en la mayoría de trabajos que abordan el estudio del crecimiento y la producción de especies forestales, resulta conveniente instalar inicialmente el mayor número posible de parcelas, ya que es frecuente la pérdida de algunas de ellas antes de poder remedirlas en una segunda ocasión, tanto por aprovechamientos como por problemas sanitarios o nutricionales que motiven cambios del vuelo. En el caso de *Eucalyptus globulus*, que es una especie de turno corto, este problema se acentúa. Además, y como también ocurre frecuentemente en estos estudios, resulta muy complicado encontrar masas adultas y de buena calidad.

El distinto origen de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* (brinzales o primera plantación, chirpiales o rebrote y clones) complica su estudio, siendo necesario contar con un número suficiente de parcelas de cada tipo, que a su vez deben representar adecuadamente las posibles combinaciones de edad, calidad de estación y densidad existentes en la región. En este caso, el estudio se ha centrado en las plantaciones de brinzales, puesto que el análisis comparativo de las procedentes de rebrote (chirpiales) requiere del conocimiento preciso de las condiciones productivas del turno anterior, información habitualmente no disponible. El seguimiento de la red de las parcelas de brinzales instaladas, si se consigue una continuidad en el tiempo por encima del primer turno, permitiría contar con datos de calidad para realizar dicho análisis.

Por otra parte, en el caso de las plantaciones clonales, que en general tienen edades por debajo de la mitad del turno de la especie, será también necesario alargar el período de estudio para poder obtener datos suficientes que permitan desarrollar modelos de crecimiento específicos.

Todas las ecuaciones presentadas en este trabajo deben ser consideradas provisionales, a la espera de completar el segundo inventario de las parcelas y de aumentar el número de árboles tipo, que permitirán mejorar y actualizar las ecuaciones disponibles y ajustar otras herramientas como curvas de calidad de estación, tablas de producción, diagramas de manejo de la densidad o modelos dinámicos de rodal, etc. El objetivo final es implementar dichas herramientas en programas informáticos de sencillo manejo (como GesMO[®] y otros, ver Diéguez-Aranda *et al.*, 2009), que facilitarán la estimación de crecimientos y producciones de estas plantaciones. En cualquier caso, la utilización de las ecuaciones que se presenta no debe realizarse nunca fuera del rango de las variables utilizadas para su elaboración.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto AGL2010-22308-C02-01: "Modelización del crecimiento y la producción en plantaciones de brinzales de *Eucalyptus globulus* Labill. del NO de España", del Ministerio de Ciencia e Innovación, financiado por la Unión Europea mediante fondos FEDER. Se agradece a las empresas ENCE, Maderas Villapol y ASEFOR, a la "Asociación de productores de madera de Cerdido" (PROMACER) y a la "Federación de Asociaciones de Productores de Madera de Galicia" (PROMAGAL), su inestimable colaboración por aportar lugares para la instalación de las parcelas de inventario.

REFERENCIAS

- António, N.; Tomé, M.; Tomé, J.; Soares, P. and Fontes, L., 2007.** Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 5, 895-906.
- Brañas, J.; González-Río, F.; Rodríguez Soalleiro, R. y Merino, A., 2000a.** Biomasa maderable y no maderable en plantaciones de eucalipto. Cuantificación y estimación. *Revista CIS-Madera* 4, 72-75.
- Brañas, J.; González-Río, F. y Merino, A., 2000b.** Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* en el noroeste de la península ibérica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 9, 317-335.
- Balboa-Murias, M. A., 2005.** Biomasa aérea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de

Compostela.

Chippendale, G. M., 1988. *Eucalyptus, Angophora (Myrtaceae)*. Flora of Australia 19. Australian Government Publishing Service, Canberra. 543 p.

De la Lama, G., 1976. Atlas del Eucalipto. Tomo I: Información y ecología. INIA, ICONA. Sevilla. 68 p.

Diéguez-Aranda, U.; Rojo Albornoz, A.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez González, J. G.; Barrio-Anta, M.; Crecente-Campo, F.; González González, J. M.; Pérez-Cruzado, C.; Rodríguez Soalleiro, R.; López-Sánchez, C. A.; Balboa-Murias, M. A.; Gorgoso Varela, J. J. y Sánchez Rodríguez, F., 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. 268 p. + CD-Rom; Disponible en <http://www.usc.es/uxfs>.

García, O. and Ruiz, F., 2003. A growth model for Eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management* 173, 49-62.

González-Río, F.; Castellanos, A.; Fernández, O.; Astorga, R. y Gómez, C., 1997. Manual de selvicultura del eucalipto. Proxecto Columella. Escola Politécnica Superior (USC), Celulosas de Asturias S.A. 95 p.

Iglesias-Trabado, G.; Carballeira-Tenreiro, R. and Folgueira-Lozano, J., 2009. *Eucalyptus universalis*; Global cultivated *Eucalyptus* forests Map. Version 1.2. In: GIT Forestry Consulting's EUCALYPTOLOGICS: Information resources on *Eucalyptus* cultivation worldwide. Retrieved from <http://www.git-forestry.com> (October 19th 2009).

Madrigal, A.; Álvarez, J. G.; Rodríguez, R. y Rojo, A., 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar. 241 p.

MMAMRM, 2011. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Comunidad Autónoma de Galicia. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

Neter, J.; Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J. and Wasserman, W., 1996. Applied linear statistical models. 4^o ed McGraw-Hill, New York.

Parresol, B. R., 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45, 573-593.

Pérez-Cruzado, C.; Merino, A. and 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.

Ruiz, F.; López, G.; Toval, G. y Alejano, R., 2008. Selvicultura de *Eucalyptus globulus* Labill. In: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (Eds). Compendio de selvicultura aplicada en España, 117-154.

Sanchez, F.; Ucha, P. and Rojo, A., 2004. Stem taper function and volumen equations with product classification for *Eucalyptus globulus* Labill. In Galicia (NW) Spain. International IUFRO 4.04.06 Meeting. The Economics and Management of High Productivity Plantations. Lugo, 27-30 Septiembre 2004.

Schumacher, F. X. and Hall, F.S., 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47, 719-73.

Toval Hernández, G., 2008. La mejora forestal a la luz de la mejora de *Eucalyptus globulus*. Cuadernos de la SECF 24, 113-122.

Xunta de Galicia, 2002. Anuario de estadística agraria 2000, Santiago de Compostela.