

Artigo

Juan Gabriel Álvarez González · Miguel Angel Balboa Murias · Agustín Merino ·
Roque Rodríguez Soalleiro

Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia

Recibido: 12 Setembro 2005 / Aceptado: 15 Outubro 2005
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2005

Resumen En este trabajo se ha caracterizado la acumulación de biomasa arbórea en masas adultas de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Diferentes intereses industriales, energéticos y ambientales han motivado que en los últimos años el análisis de las distintas posibilidades de aprovechamiento de la biomasa forestal esté adquiriendo un creciente protagonismo, por lo que la cuantificación de la biomasa arbórea de estos sistemas forestales constituye un primer paso fundamental e ineludible. La estimación de la biomasa arbórea se basa en el empleo de un sistema de ecuaciones que relacionan el peso de cada fracción arbórea con variables de árbol sencillas de medir en campo. El ajuste de este sistema de ecuaciones se ha realizado de forma simultánea empleando datos procedentes de un muestreo destructivo de 75 eucaliptos y 125 pinos seleccionados en 12 masas adultas. En las masas de eucalipto, los valores de acumulación de biomasa arbórea variaron entre 142 y 426 Mg ha⁻¹. Estos valores oscilaron entre 203 y 438 Mg ha⁻¹ para las masas de pino. Los porcentajes registrados de biomasa de madera, corteza y copa, con respecto al total de biomasa aérea fueron 82; 7 y 11 % para eucalipto y 68; 11 y 21 % para pino.

Palabras clave Modelización · Fracciones arbóreas ·
Seemingly unrelated regresión

Abstract This study provides information about the above-ground biomass of pure and even-aged stands of *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* in Galicia. In recent years, there has been considerable interest in evaluating biomass of forest ecosystems due to their importance role as energy and raw materials sources. A total of 75 eucalypt and 125 maritime pine trees were subjectively selected in 12 different stands. The trees were destructively sampled to develop biomass prediction equations of tree components. The estimation of the above-ground biomass was based on a system of equations relating the weight of each tree component with tree and stand variables. All the equations were fitted simultaneously using Seemingly Unrelated regression. The above-ground biomass of eucalypt stands ranged from 142 to 426 Mg ha⁻¹. These values ranged from 203 to 438 Mg ha⁻¹ in maritime pine stands. The biomass percentages obtained for stem wood, stem bark and crown were 82; 7 and 11 % for eucalypts stands and 68; 11 and 21 % for maritime pine stands.

Keywords Modelling · tree components · Seemingly unrelated regression

Introducción

Se conoce como biomasa a la cantidad de materia que existe en un determinado ecosistema por unidad de superficie o de volumen (Newbould 1970; Pardé 1980). Esta biomasa puede emplearse para estimar las cantidades potenciales de diversos productos y combustibles, para determinar la eficiencia de un rodal forestal, o en las relaciones suelo-agua-planta y nutrientes con la productividad del sitio (Anderson 1971; Chiyenda & Kozak 1984). El conocimiento de la dinámica de acumulación de biomasa es importante para comprender el funcionamiento del ecosistema forestal, ya que refleja la distribución del material orgánico y permite evaluar los efectos de una

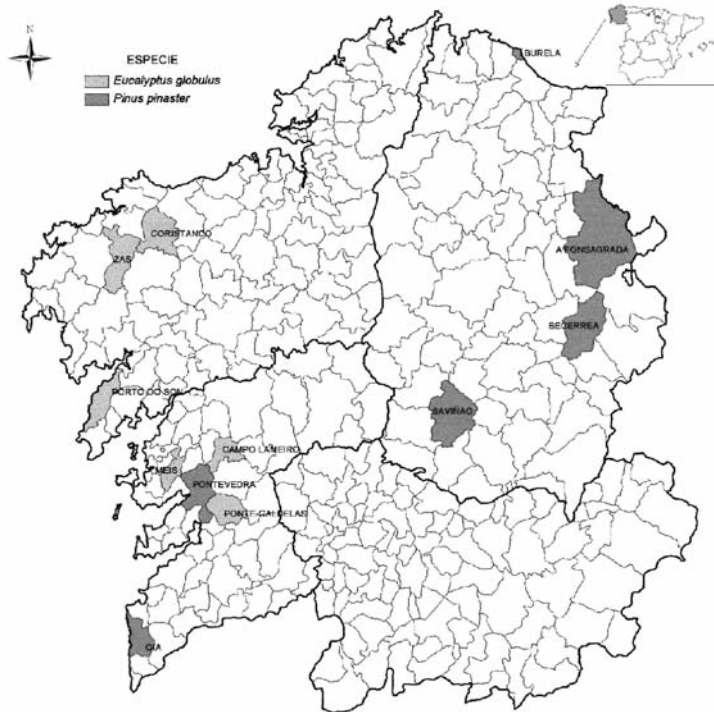


Figura 1.- Localización de las parcelas de muestreo para *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus*.

intervención de carácter antrópico (Teller 1988). En la actualidad, las líneas de actuación en este ámbito se centran fundamentalmente en el interés que la biomasa despierta como materia prima de procesos industriales y energéticos, y en las repercusiones ambientales de este tipo de actuaciones. La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha tienen como objetivo conocer cómo influye la acumulación y distribución de la biomasa en el equilibrio del ecosistema (flujos de energía y de nutrientes), evaluar las posibilidades energéticas e industriales en determinadas regiones o determinar el potencial de almacenamiento de C de la atmósfera en los sistemas forestales a medio y largo plazo, en relación a la contribución de las masas arboladas al ciclo global del carbono (van Laar & Akça 1997). Además, la estimación de la biomasa y su distribución espacial se está mostrando como una herramienta complementaria muy útil para la gestión selvícola y su influencia en el control de plagas, incendios y la conservación de los suelos (Pardé 1980).

El noroeste de la Península Ibérica es una de las regiones de mayor productividad forestal potencial de Europa. En las últimas décadas el incremento de la superficie forestal arbolada en esta región ha sido continuo, especialmente el relativo a especies de crecimiento rápido (Xunta de Galicia 2001). Por otro lado, diferentes intereses industriales, energéticos y ambientales han dirigido su atención a la biomasa forestal, especialmente las industrias de trituración y de pasta de papel, dada su importancia en Galicia, que demandan cada vez en mayor medida biomasa forestal no maderable (Bermúdez & Piñeiro 2000). Estudios previos revelan que Galicia, amparándose en su elevado

rendimiento forestal y en su desarrollado sector de transformación de la madera, podría ser capaz de asimilar buena parte de estos recursos arbóreos no maderables para el aprovechamiento industrial o energético (Bermúdez & Touza 2000; Bermúdez & Piñeiro 2001). Entre las estrategias se encuentra el aprovechamiento de fracciones arbóreas no maderables tras el aprovechamiento forestal o el establecimiento de plantaciones y programas de manejo especialmente diseñados para la producción de biomasa.

Bajo esta perspectiva de posible aprovechamiento de fracciones de biomasa arbórea, se hace necesario aportar información que permita elaborar unos criterios de sostenibilidad de nuestras masas forestales, especialmente en especies de crecimiento rápido manejadas de forma intensiva. Los turnos reducidos de estas especies y, en muchos casos los aprovechamientos intensos de gran parte de las fracciones arbóreas, suponen la extracción a través de la biomasa de una importante proporción de los nutrientes del sistema. En este contexto, el manejo de los restos vegetales de corta de la explotación desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la fertilidad de estos sistemas, ya que por norma general, las fracciones de copa y la corteza presentan las concentraciones de nutrientes más altas (Hopmans et al. 1993; Cortina & Vallejo 1994; Fisher & Binkley 2000).

El objetivo de este trabajo es obtener unas ecuaciones que permitan estimar la biomasa de las diferentes fracciones arbóreas de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster*. Estas ecuaciones, combinadas con los modelos de crecimiento de masa ya existentes para estas especies (García & Ruíz 2003; Álvarez González et al. 1999) y con datos sobre las

| Localización | Material geológico | Pendte (%) | Altitud (m) | Edad (años) | N (pies/ha) | G (m ² /ha) | d_g (cm) | \bar{h} (m) | h_{dom} (m) |
|-----------------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|------------|---------------|---------------|
| Coristanco (A Coruña) | Anfibolita | 16,2 | 270 | 18 (3ª rot) | 2400 | 34 | 13,4 | 21,6 | 26,77 |
| Zas (A Coruña) | Gneis | 3,0 | 260 | 14 (3ª rot) | 2250 | 29,5 | 12,9 | 18,95 | 23,7 |
| Porto do Son (A Coruña) | Granito | 29,8 | 190 | 18 (2ª rot) | 2100 | 39,8 | 15,4 | 19,39 | 25,8 |
| Meis (Pontevedra) | Granito | 4,2 | 140 | 24 (2ª rot) | 1150 | 49,6 | 23,5 | 29,53 | 35,67 |
| Campo Lameiro (Pontevedra) | Granito | 4,5 | 390 | 16 (2ª rot) | 1250 | 30,7 | 17,7 | 21,53 | 23,7 |
| Ponte Caldelas (Pontevedra) | Granito | 9,9 | 320 | 13 (3ª rot) | 1200 | 22,3 | 15,3 | 21,41 | 25,07 |
| <i>Media</i> | | 11,3 | 262 | 17 | 1725 | 34,3 | 16,4 | 22,07 | 26,79 |
| <i>Desv. típ.</i> | | 10,3 | 89 | 4 | 583 | 9,4 | 3,9 | 3,83 | 4,51 |

N: densidad; G: área basimétrica; d_g : diámetro medio cuadrático; \bar{h} : altura media; h_{dom} : altura dominante; rot.= rotación

Tabla 1.- Localización y características fisiográficas y dasométricas de las seis masas de *Eucalyptus globulus* seleccionadas.

| Localización | Material geológico | Pendte (%) | Altitud (m) | Edad (años) | N (pies/ha) | G (m ² /ha) | d_g (cm) | \bar{h} (m) | h_{dom} (m) |
|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|------------|---------------|---------------|
| Becerreá (Lugo) | Pizarra | 29,1 | 800 | 43 | 900 | 88,7 | 35,4 | 20,9 | 21,47 |
| A Fonsagrada (Lugo) | Pizarra | 35,1 | 627 | 39 | 955 | 78,7 | 32,4 | 16,18 | 17,95 |
| O Saviñao (Lugo) | Esquistos | 1,3 | 656 | 42 | 919 | 67 | 30,5 | 20,06 | 20,84 |
| A Guarda (Pontevedra) | Granito | 30,1 | 160 | 44 | 396 | 51,4 | 40,7 | 21,29 | 23,76 |
| Campañó (Pontevedra) | Gneis | 16,1 | 184 | 34 | 693 | 56,9 | 32,3 | 21,56 | 22,44 |
| Burela (Lugo) | Granito | 27,6 | 300 | 43 | 764 | 46 | 27,7 | 15,56 | 16,34 |
| <i>Media</i> | | 23,2 | 454 | 40,3 | 805 | 66,4 | 32,9 | 19,26 | 20,47 |
| <i>Desv. típ.</i> | | 12,4 | 273 | 3,6 | 247 | 19,5 | 4,4 | 2,68 | 2,80 |

N: densidad; G: área basimétrica; d_g : diámetro medio cuadrático; \bar{h} : altura media; h_{dom} : altura dominante.

Tabla 2.- Localización y características fisiográficas y dasométricas de las seis masas de *Pinus pinaster* seleccionadas.

concentraciones de carbono y otros nutrientes por fracción arbórea y especie (Balboa 2005) permitirán analizar la influencia de diferentes esquemas selvícolas y de manejo de restos sobre el ecosistema forestal.

Material y métodos

Área de estudio

La determinación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia se basó en la instalación de una red parcelas temporales en masas monoespecíficas seleccionadas subjetivamente en el área de distribución de las dos especies. Se estudiaron un total de seis masas de cada especie. En la Figura 1 aparecen reflejados los municipios en los que se realizó el muestreo.

Eucalyptus globulus es la tercera especie en importancia en Galicia en cuanto a superficie ocupada se refiere. Aparece fundamentalmente en forma de plantaciones monoespecíficas (174.000 ha), y en menor medida formando masas mixtas con frondosas (29.000 ha) o con *Pinus pinaster* (160.000 ha) (Xunta de Galicia 2001). Los crecimientos medios varían en función de la calidad de estación, determinada básicamente por los aspectos climáticos y edáficos (Calvo de Anta 1992), del número de turno o rotación en la que se encuentre la plantación (Fernández López 1982) y de las técnicas selvícolas empleadas (fertilización, calidad de planta, control de vegetación adventicia) (González Río et al. 1997). El rango general de productividad oscila entre 10 y 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹, con una media de 20 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Las características de las seis plantaciones de *Eucalyptus globulus* estudiadas figuran en la Tabla 1.

Todas las plantaciones estudiadas se acercaron o sobrepasaron ligeramente el turno de máxima renta en especie, oscilando las edades entre los 13 y los 24 años. En todos los casos se trataba de segundas o terceras rotaciones en monte bajo después de cortas a matarrasa con selección posterior de brotes.

La superficie ocupada por masas monoespecíficas de *Pinus pinaster* (pino gallego) en Galicia asciende a 383.000 ha, mientras que 235.000 ha corresponden a masas mixtas con frondosas (fundamentalmente *Eucalyptus globulus*) (Xunta de Galicia 2001). En las mejores calidades proporciona unos crecimientos medios máximos en torno a 20 m³ ha⁻¹ año⁻¹.

Las masas que se han seleccionado para este estudio presentan una superficie mínima de una hectárea, son monoespecíficas, en monte alto regular o coetáneo, ya que proceden de repoblación, a excepción de las que se localizan en Pontevedra, donde los pies proceden de regeneración natural. En todos los casos se rondaba el final de turno, con edades entre 34 y 44 años (Tabla 2).

De las seis masas forestales de *Pinus pinaster* ssp. atlantica seleccionadas tres son representativas de las masas de la Galicia costera y las restantes de la Galicia interior. La división entre las dos zonas es coincidente con las áreas de mejora de la especie marcadas por el Plan de Mejora Genética Forestal de Galicia (Vega et al. 1993), que a su vez se fundamentó en estudios climáticos previos (Toval & Vega 1982). En tres de las masas estudiadas en Lugo no se ha realizado ninguna clara, y solo una de las masas de Pontevedra presenta una densidad al final del turno próxima a las que se plantean como recomendables en la actualidad. Se trata, por tanto, de masas adultas, de diferentes calidades y normalmente con altas densidades.

Proceso de muestreo para la determinación de la biomasa arbórea

Las labores de campo para la determinación y modelización de la biomasa arbórea se fundamentaron en el apeo y posterior análisis y toma de muestras de 125 pies de *Pinus pinaster* y 75 de *Eucalyptus globulus*. En el caso de *Pinus pinaster* 75 de los árboles fueron apeados en las seis masas descritas anteriormente, mientras que los otros 50 procedieron de una masa de 10 años que estaba siendo aclarada.

En cada una de las 12 masas estudiadas se instaló una parcela temporal rectangular, de dimensiones variables en función de la densidad de la masa, de forma que en cada una de ellas se pudiese contar con un mínimo de 35-40 árboles representativos. Se midió el diámetro normal de todos los árboles en dos direcciones perpendiculares con aproximación al mm; la altura de una muestra representativa de al menos el 30 % de los árboles con

precisión de cm.; y la altura de los árboles dominantes siguiendo el criterio de Assmann (1970). A partir de estos datos se estimaron las principales variables de masa: número de pies por hectárea, área basimétrica (m² ha⁻¹), diámetro medio cuadrático y altura media.

En cada una de las masas estudiadas se seleccionaron subjetivamente entre 10 y 14 árboles, que fueron apeados y a los que se les aplicó un muestreo destructivo para determinar la distribución por fracciones de su biomasa. La biomasa arbórea fue dividida en las siguientes fracciones: madera (hasta 7 cm en punta delgada con corteza), corteza, ramas gruesas (diámetro en la inserción con el tronco o con una rama superior entre 2 y 7 cm), ramas finas (diámetro en la inserción con el tronco o con una rama superior entre 0,5 y 2 cm), ramillos (diámetro menor de 0,5 cm en la inserción con el tronco o con una rama superior) y hojas o acículas. Las ramas gruesas, ramas finas y ramillos se han analizado como fracciones íntegras formadas por madera más corteza.

En campo, y para cada uno de los árboles apeados se pesaron en verde la totalidad de las fracciones con una báscula con precisión de hasta 100 g. La madera y la corteza se pesaron de forma conjunta. Además, se cubicaron todas las trozas con y sin corteza para el cálculo posterior de la densidad de la madera. Se tomaron tres muestras de fuste, en forma de discos transversales a diferentes alturas, de modo que en el laboratorio, después de separar madera y corteza se pudiese determinar el porcentaje en peso húmedo de cada una de ellas. También se tomaron muestras aleatorias en la parte baja, media y alta de la copa de las restantes fracciones para su secado en laboratorio.

Las muestras húmedas de todas las fracciones del árbol fueron llevadas a laboratorio para, después de un proceso de secado a 65 °C hasta peso constante, determinar la humedad de cada muestra y calcular el peso seco de cada fracción.

De forma complementaria al ajuste de las funciones de biomasa de las fracciones arbóreas de *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus* se ha ajustado una función para la biomasa total seca de los rebrotes de cepa de *Eucalyptus globulus*, considerados como los pies de diámetro normal inferior a 5 cm. Los datos empleados proceden de la selección y posterior apeo de 26 rebrotes en una masa aprovechada previamente a un turno de 17 años donde, un año y medio después de la corta y para la mayoría de las cepas, se había hecho una selección de brotes inicial, dejando dos o tres por pie. Estas 26 varas fueron apeadas en campo y fraccionadas en fuste, ramillos y hojas. Cada una de estas fracciones fue pesada en campo, llevando una muestra a laboratorio para determinar el porcentaje de humedad de cada componente tras un proceso de secado a 65 °C. La variable dependiente finalmente considerada en

los ajustes fue el peso seco total del rebrote. En cada uno de los rebrotes se midieron el diámetro normal y la altura total, que se emplearon en los ajustes como variables explicativas.

Ecuaciones de biomasa de las diferentes fracciones

Una vez determinada la biomasa seca de las diferentes fracciones de los árboles medidos es necesario desarrollar un modelo matemático que relacione dichos pesos con una o más variables dimensionales representativas de estos árboles (Satoo & Madgwick 1982).

Se analizaron diferentes modelos, lineales y no lineales, para relacionar el peso seco de las diferentes fracciones arbóreas con las varias de árbol individual y/o de masa. La expresión matemática general de estas relaciones es la siguiente:

$$W = f(X, \beta) + e \quad (1)$$

donde W representa el peso seco de la fracción arbórea: madera, corteza, ramas gruesas, ramas finas, ramillos y hojas o acículas; X representa las variables independientes empleadas, β representa los parámetros del modelo a estimar y e es el error del modelo.

Para poder garantizar la compatibilidad entre las estimaciones de biomasa aérea total y la suma de cada una de las fracciones que la componen y, teniendo en cuenta que sería irreal considerar que los errores entre las ecuaciones no están relacionados (Borders 1989; Parresol 1999, 2001), las ecuaciones de todas las fracciones se ajustaron simultáneamente empleando la metodología de ecuaciones aparentemente no relacionadas ("Seemingly Unrelated Regresión") usando el procedimiento SAS/ETS del programa estadístico SAS (SAS Institute Inc. 2000) lo que permite minimizar el error asociado a todo el sistema de ecuaciones simultáneamente.

La comparación de los modelos se basó en el análisis gráfico de los residuos y en dos estadísticos de bondad del ajuste basados en ellos: la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Las expresiones de estos dos estadísticos son las siguientes:

$$(2) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

$$(3) \quad R^2_{adj} = 1 - (n-1) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} / (n-p)$$

siendo:

y_i \hat{y}_i \bar{y} = valores observado, predicho y medio de la variable dependiente, respectivamente,

n = número de observaciones

p = número de parámetros del modelo.

En el ajuste de las ecuaciones de biomasa se pueden emplear como variables explicativas tanto variables individuales como de masa, siendo las primeras las más utilizadas debido a su mayor facilidad de medición. Las mediciones necesarias para cuantificar la biomasa de un árbol con cierta exactitud son lentas y costosas, por lo que se hace necesario disponer de herramientas que permitan obtener el peso de las diferentes fracciones arbóreas de forma rápida, a partir de variables sencillas de medir como el diámetro normal y la altura total. De forma general, las variables explicativas de una ecuación de biomasa deben ser: (1) poco numerosas y fáciles de medir, (2) variables fuertemente correlacionadas con la biomasa, (3) variables poco correlacionadas entre sí, evitando la multicolinealidad.

Para evaluar la existencia de multicolinealidad entre las variables independientes se ha empleado el número de condición, que se define como la raíz cuadrada del ratio entre el mayor y el menor autovalor de la matriz de correlaciones. Según Belsey (1991), si el número de condición supera el valor de 30 las estimaciones de los errores estándar de los parámetros están seriamente afectadas.

Otro problema que aparece con frecuencia en el ajuste de ecuaciones de biomasa es que los errores presenten una acusada falta de homogeneidad de varianzas. La mayoría de las veces la varianza del error está relacionada con alguna de las variables independientes empleadas en el modelo (X_j), por lo que, para evitar este problema, a cada observación se le puede asignar un peso igual a la inversa de su varianza ($1/X_j^2$). El inconveniente de aplicar esta corrección es que la varianza es, a priori desconocida, por lo que en este estudio se ha empleado la metodología propuesta por Harvey (1976), que consiste en usar los errores estimados en el ajuste sin emplear pesos (\hat{e}_i) como variable dependiente en un modelo de estimación de la varianza del error, donde k es un parámetro a estimar empleando mínimos cuadrados.

Resultados y discusión

Modelización de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus*

En la Tabla 3 figuran las expresiones de los modelos de biomasa ajustados individualmente, junto con el factor de ponderación empleado en cada caso y los valores de los

| Fracción | Modelo | Ponderación | RMSE | R^2_{adj} |
|---------------|---|-------------------------|-------|-------------|
| Madera | $W = -12,9853 + 0,0355 \cdot d^2 h$ | $1/(d^2 \cdot h)^{2,2}$ | 79,37 | 0,97 |
| Corteza | $W = -1,1395 + 0,0044 \cdot d^2 h$ | $1/(d^2 \cdot h)^{3,4}$ | 15,24 | 0,90 |
| Ramas gruesas | $W = 40,6622 - 4,3653 \cdot d + 0,1642 \cdot d^2$ | $1/d^{3,6}$ | 20,75 | 0,66 |
| Ramas finas | $W = 0,0111 \cdot d^{2,7647} \cdot G^{-0,5186}$ | $1/d^{5,4}$ | 4,40 | 0,80 |
| Ramillos | $W = 0,1825 \cdot d^{3,1956} \cdot G^{-1,8413}$ | $1/d^{5,2}$ | 4,64 | 0,67 |
| Hojas | $W = 0,1427 \cdot d^{3,1049} \cdot G^{-1,4055}$ | $1/d^{5,2}$ | 12,70 | 0,65 |
| Rebrotos | $W = 0,0676 + 0,0425 \cdot d^2 h$ | $1/(d^2 \cdot h)^{0,9}$ | 0,53 | 0,97 |

W representa el peso seco del componente arbóreo correspondiente (kg), d el diámetro normal (cm), h la altura total (m) y G el área basimétrica ($m^2 ha^{-1}$).

Tabla 3.- Expresión de los modelos de biomasa ajustados para cada fracción de *Eucalyptus globulus* y valores de los estadísticos de bondad del ajuste.

estadísticos de bondad del ajuste. En todos los modelos W representa el peso seco del componente arbóreo correspondiente (kg), d el diámetro normal (cm), h la altura total (m) y G el área basimétrica ($m^2 ha^{-1}$). La ecuación de biomasa total se obtiene como suma de las ecuaciones de todas las fracciones. En ningún caso se observaron problemas de multicolinealidad.

En la Tabla 4 se recogen los valores medio, máximo y mínimo de peso seco y sus porcentajes para las diferentes fracciones arbóreas obtenidos en las seis masas analizadas, una vez aplicadas las ecuaciones de biomasa a los datos obtenidos en el inventario dasométrico. Como se puede observar, los porcentajes de peso seco de cada una de las fracciones con respecto a la biomasa total arbórea son bastante constantes en todas las parcelas estudiadas. La secuencia de acumulación de biomasa en las fracciones arbóreas observada es la siguiente: madera > corteza > ramas gruesas > hojas = ramas finas > ramillos.

La madera es claramente la fracción que más biomasa aporta, representando una media del 82 % del peso total arbóreo, y le sigue la corteza, con un 7 %. Este porcentaje de madera se relaciona exponencialmente con la edad de la masa ($r = 0,88$; $P < 0,05$), de modo que a medida que aumenta la edad de la plantación aumenta ligeramente la proporción de peso de madera con respecto a la biomasa total. Por otro lado, las fracciones de copa (ramillos, ramas finas, y ramas gruesas) suponen una media del 11 % de la biomasa arbórea.

Los valores de biomasa arbórea oscilan entre 142 y 426 Mg ha^{-1} , que corresponden con la parcela más joven (13 años y densidad de 1200 pies ha^{-1}) y la de más edad (24 años y densidad de 1150 pies ha^{-1}) respectivamente. Las cantidades promedio de madera, corteza y fracciones de copa en las masas estudiadas alcanzan los 184, 16 y 22 Mg ha^{-1} , respectivamente.

| Localidad | Madera (Mg ha^{-1}) | Corteza (Mg ha^{-1}) | R. gruesas (Mg ha^{-1}) | Ramas finas (Mg ha^{-1}) | Ramillos (Mg ha^{-1}) | Acículas (Mg ha^{-1}) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Coristanco | 151,4 82,6 % | 14,5 7,9 % | 9,0 4,9 % | 3,8 2,1 % | 1,5 0,8 % | 3,1 1,7 % |
| Zas | 122,3 81,5 % | 12,2 8,1 % | 7,8 5,2 % | 3,5 2,3 % | 1,5 1,0 % | 2,8 1,9 % |
| P. do Son | 187,4 83,8 % | 17,5 7,8 % | 9,9 4,4 % | 4,1 1,8 % | 1,4 0,6 % | 3,2 1,4 % |
| Meis | 364,7 85,5 % | 27,0 6,3 % | 20,1 4,7 % | 5,7 1,3 % | 2,1 0,5 % | 6,9 1,6 % |
| C. Lameiro | 170,2 81,9 % | 14,6 7,0 % | 12,1 5,8 % | 4,3 2,1 % | 2,0 1,0 % | 4,6 2,2 % |
| P. Caldelas | 111,9 78,7 % | 10,0 7,0 % | 10,1 7,1 % | 3,8 2,7 % | 2,2 1,5 % | 4,2 3,0 % |
| <i>Media</i> | 184,7 82,3 % | 16,0 7,4 % | 11,5 5,4 % | 4,2 2,1 % | 1,8 0,9 % | 4,1 2,0 % |
| <i>Desv. estand</i> | 92,7 2,3 % | 6,0 0,7 % | 4,4 1,0 % | 0,8 0,5 % | 0,4 0,4 % | 1,5 0,6 % |

Tabla 4.- Valores de biomasa acumulada en las masas de *Eucalyptus globulus* estudiadas. En cursiva se incluye el porcentaje de peso seco de cada una de las fracciones arbóreas consideradas con respecto a la biomasa aérea total.

| Fracción | Modelo | Ponderación | RMSE | R^2_{adj} |
|---------------|--|-------------------------|-------|-------------|
| Madera | $W = 0,38820 + 0,01149 \cdot d^2 h$ | $1/(d^2 \cdot h)^{3,5}$ | 51,22 | 0,91 |
| Corteza | $W = 0,03687 \cdot d^{2,09830} \cdot G^{-0,05511}$ | $1/d^{4,3}$ | 6,29 | 0,94 |
| Ramas gruesas | $W = 3,20193 - 0,01484 \cdot d^2 -$ $- 0,42284 \cdot h + 0,00279 \cdot d^2 h$ | $1/(d^2 \cdot h)^{3,5}$ | 13,85 | 0,81 |
| Ramas finas | $W = 0,09781 \cdot d^{2,28812} \cdot h^{-0,96484}$ | $1/d^{3,9}$ | 4,74 | 0,83 |
| Ramillos | $W = 0,00188 \cdot d^{2,15370}$ | $1/d^{5,5}$ | 1,42 | 0,68 |
| Acículas | $W = 0,02710 \cdot d^{2,50981} \cdot \bar{h}^{-0,69492}$ | $1/d^{4,4}$ | 5,81 | 0,82 |

W representa el peso seco del componente arbóreo correspondiente (kg), d el diámetro normal (cm), h la altura total (m) y \bar{h} la altura media (m).

Tabla 5.- Expresión de los modelos de biomasa ajustados para cada fracción de *Pinus pinaster* junto con el coeficiente de ponderación y los valores de los estadísticos de bondad del ajuste.

| Localidad | Madera (Mg ha ⁻¹) | Corteza (Mg ha ⁻¹) | Ramas gruesas (Mg ha ⁻¹) | Ramas finas (Mg ha ⁻¹) | Ramillos (Mg ha ⁻¹) | Acículas (Mg ha ⁻¹) |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Becerreá | 296,4 67,8 % | 48,7 11,2 % | 47,8 10,7 % | 18,3 4,2 % | 3,8 0,9 % | 22,6 5,2 % |
| A Fonsagrada | 254,6 67,9 % | 42,2 11,3 % | 39,5 10,5 % | 15,9 4,2 % | 3,3 0,9 % | 19,5 5,2 % |
| O Saviñao | 211,0 68,0 % | 35,2 11,4 % | 31,7 10,2 % | 13,3 4,3 % | 2,8 0,9 % | 16,2 5,2 % |
| A Guarda | 183,4 67,6 % | 29,5 10,9 % | 31,1 11,5 % | 11,1 4,1 % | 2,2 0,8 % | 14,0 5,2 % |
| Campañó | 184,3 67,9 % | 30,6 11,3 % | 28,6 10,5 % | 11,5 4,2 % | 2,4 0,9 % | 14,1 5,2 % |
| Burela | 138,4 68,2 % | 23,6 11,6 % | 19,4 9,6 % | 8,8 4,3 % | 1,9 0,9 % | 10,7 5,3 % |
| <i>Media</i> | 215,3 67,9 % | 35,7 11,3 % | 33,4 10,5 % | 13,4 4,2 % | 2,8 0,9 % | 16,5 5,2 % |
| <i>Desv. estand.</i> | 63,9 0,2 % | 10,5 0,3 % | 10,6 0,6 % | 4,0 0,1 % | 0,8 0,0 % | 4,9 0,1 % |

Tabla 6.- Valores de biomasa acumulada en las masas de *Pinus pinaster* estudiadas. Se incluye en cursiva el porcentaje de peso seco de cada una de las fracciones arbóreas consideradas con respecto a la biomasa aérea total.

La cantidad de biomasa arbórea acumulada en estas plantaciones aumenta a medida que aumenta la edad de la masa y el área basimétrica. Similares resultados se han obtenido para otras especies del mismo género (O'Connell & Menagé 1982; Brañas et al. 2000). La producción anual de biomasa aérea seca no varía excesivamente en las parcelas estudiadas, con valores que oscilan entre 10,2 y 13 Mg ha⁻¹ año⁻¹, aspecto que refleja las escasas diferencias en cuanto a calidad de estación. La masa de Meis manifiesta un comportamiento distinto, con producciones de 17,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, bastante superiores al resto de casos, aunque la diferencia de edad entre esta parcela y las restantes es muy grande (24 años frente a 13-18 años, respectivamente).

En otros estudios con diferentes especies del género *Eucalyptus* llevados a cabo en Australia, Portugal y España se han registrado valores de acumulación de biomasa arbórea anual que oscilan entre los 13 (Birk & Turner 1992;

Cortez & Madeira 1998) y los 19 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Spangenberg et al. 1996; Brañas et al. 2000). En esos mismos estudios los valores para las fracciones no maderables (corteza, ramas y hojas) oscilaron entre 3 y 6 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados son similares a los de este trabajo aunque, hay que tener en cuenta que no son directamente comparables puesto que la mayoría de los primeros se realizaron sobre parcelas instaladas en ensayos de fertilización.

Modelización de la biomasa arbórea de *Pinus pinaster*

En la Tabla 5 figuran las expresiones de los modelos de biomasa ajustados individualmente, junto con el factor de ponderación empleado en cada caso y los valores de los estadísticos de bondad del ajuste. En todos los modelos W representa el peso seco del componente arbóreo correspondiente (kg), d el diámetro normal (cm), h la altura total (m) y \bar{h} la altura media (m). La ecuación de biomasa total

se obtiene como suma de las ecuaciones de todas las fracciones. Ninguna de las ecuaciones mostró problemas de multicolinealidad.

Se ha observado la siguiente secuencia de acumulación de biomasa en las fracciones arbóreas: madera > corteza > ramas gruesas > hojas > ramas finas > ramillos (Tabla 6). La madera es la fracción que aporta mayor biomasa, representando un promedio del 68 % del peso arbóreo. La corteza y las acículas suponen el 11 % y el 5 % respectivamente. Los restos de corta (ramas y acículas) suponen algo más del 20 % de la biomasa arbórea.

Los resultados obtenidos por Montero et al. (1999) en un estudio sobre la variación de la distribución de biomasa arbórea de *Pinus pinaster* subesp. mediterránea bajo diferentes regímenes de claras mostraron que, en lo que respecta a la distribución de biomasa entre las diferentes partes del árbol, la madera y la corteza representan entre el 62 y el 79 % de la biomasa total, para árboles jóvenes y adultos, respectivamente. Los porcentajes de peso seco de ramas finas y gruesas también variaban dependiendo de la edad del árbol, oscilando en el primer caso entre un 20 % y un 8 %, y en el segundo entre un 8 % y un 11 %, para árboles jóvenes y adultos, respectivamente. El porcentaje de biomasa de acículas con respecto al total no varía en función de la edad del árbol, manteniéndose alrededor del 10 %. Si comparamos los resultados del presente trabajo con los aportados por Montero et al. (1999), observamos que los porcentajes de madera y corteza son muy similares, de forma análoga a lo que sucede con las ramas gruesas, especialmente en el caso de las clases diamétricas más altas. Donde se han apreciado mayores diferencias ha sido en las ramas finas y en la fracción foliar, ya que en el presente trabajo se han registrado porcentajes de ramas finas (incluyendo ramillos) y de acículas con respecto a la biomasa total de 5,1 y 5,2 %, respectivamente frente al 8 y el 10 % de Montero et al. (1999). Hay que tener en cuenta que se trata de dos subespecies con diferentes pautas de

crecimiento y distintos comportamientos frente a la competencia intra-específica, factores que influyen en el desarrollo de la copa. Otro factor que puede provocar que los porcentajes de acículas en la subespecie atlántica sean inferiores es la menor persistencia de acículas viejas (3-4 años) en las ramillas.

En la región de las Landas francesas es donde se localizan los trabajos más completos relativos a la modelización del crecimiento y la producción de pino marítimo (Lemoine 1969; Lemoine et al. 1986; Salas González 1995). Porté et al. (2002), estudiaron la biomasa arbórea de dos plantaciones de *Pinus pinaster* subesp. atlántica de 26 y 32 años, registrando una proporción de ramas algo inferior al observado en este estudio, 13,2 % y 11,4 %, respectivamente, mientras que el porcentaje de madera era algo superior, 75,5 % y 78,2 %. Este mayor porcentaje de madera y menor de ramas puede ser explicado no sólo por las características genéticas del material vegetal de partida empleado en la plantación sino también por los tratamientos selvícolas llevados a cabo, que plantean menores densidades y un correcto esquema de podas. La proporción de corteza que registraron estos autores fue muy similar a la obtenida en el presente estudio, y se sitúa en 10,3 % y 11,2 % para las plantaciones de 32 y 26 años, respectivamente.

Lemoine et al. (1984, 1986) en una plantación de 16 años en Las Landas, con 817 pies ha⁻¹, encontró una mayor proporción de copa (9 % de acículas, 21 % de ramas vivas y muertas, y 15 % ramillos). La madera del tronco apenas representaba el 47 % de la biomasa arbórea. Esta mayor representación de las fracciones de copa frente a la biomasa del fuste en individuos de poca edad ya ha sido puesta de manifiesto por otros autores (Pardé 1980; O'Connell & Menagé 1982).

Por último, se ha caracterizado la distribución de la biomasa arbórea de *Pinus pinaster* de forma separada para las dos ecoregiones de esta especie en Galicia, la costera y la

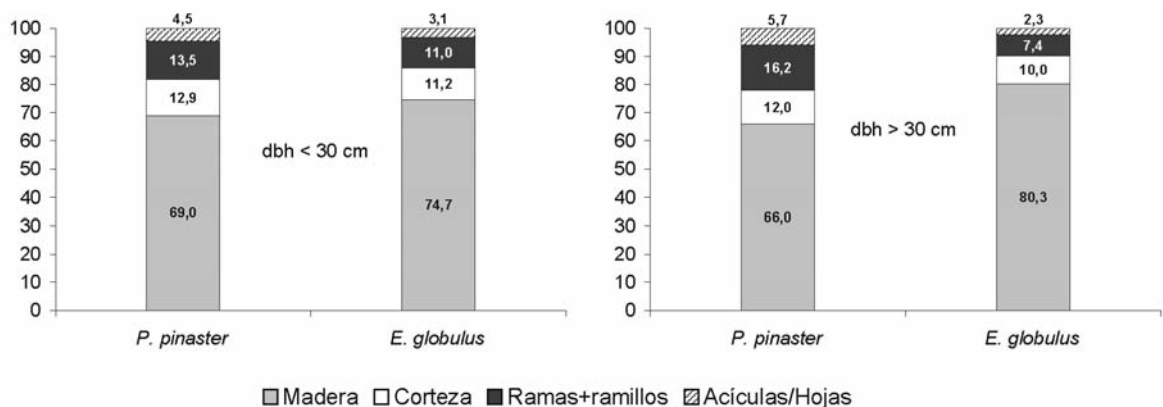


Figura 2.- Distribución promedio de la biomasa arbórea en *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus* para individuos con diámetro normal menor de 30 cm (dbh < 30 cm) y superior a 30 cm (dbh > 30 cm), respectivamente.

interior, observando que las diferencias más significativas se centran en el mayor porcentaje de madera y menor de corteza que registra el pinaster costero. En el resto de las fracciones el comportamiento en ambas ecoregiones es muy similar.

Los valores de biomasa acumulada en las plantaciones estudiadas oscilan entre 203 y 437,6 Mg ha⁻¹, correspondiendo los más altos a las masas de mayores densidades (900 pies ha⁻¹). Porté et al. (2002) registraron valores de 113 y 144 Mg ha⁻¹ en plantaciones de 26 años y 600 pies ha⁻¹, y 32 años y 335 pies ha⁻¹ respectivamente. En nuestro caso los restos de corta suponen algo más del 20 % de la biomasa arbórea, que se traducen en unas cantidades de 41 a 92 Mg ha⁻¹. Las diferencias en cuanto a producción anual de biomasa seca son significativas, variando en función de la calidad de estación y del área basimétrica. En la parcela de Becerreá, con 88 m² ha⁻¹ de área basimétrica se alcanzan los 8 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en la de Burela, con 46 m² ha⁻¹ se llega a los 3,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

En la Figura 2 se refleja la evolución de la distribución de la biomasa arbórea de las dos especies estudiadas, analizando de forma separada los pies de diámetro normal menor de 30 cm y los de diámetro normal mayor de 30 cm.

La especie que mostró una distribución de la biomasa más uniforme para todas las clases dimensionales fue *Pinus pinaster*. En este caso, en los pies de mayor diámetro aumentó ligeramente el porcentaje de ramas con respecto a los árboles de menores dimensiones. En eucalipto la diferenciación de la distribución de la biomasa en función de la dimensión del árbol fue más marcada. *Eucalyptus globulus* fue la única especie que mostró un incremento del porcentaje de madera al aumentar el diámetro de los pies, al mismo tiempo que disminuían los porcentajes de corteza y de las fracciones de copa.

Agradecimientos

Los fondos para la realización de este estudio han sido aportado por el Ministerio de Ciencia y tecnología (programa PROFIT) y por el CIS-Madera (Xunta de Galicia). Queremos agradecer la ayuda prestada por el Ingeniero de Montes S. Arenas (Xunta de Galicia) para la instalación de parte de la red de parcelas, a B. Vázquez por su inestimable colaboración en los trabajos de campo y por supuesto a J. Bermudez, M. Touza, F. Sanz, G. Piñeiro y M. Santalla del CIS Madera como promotores del estudio.

Bibliografía

Álvarez, J.G., Rodríguez Soalleiro, R. & Vega, G. (1999). Elaboración de un modelo dinámico para rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait en Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 8: 319-334.

Anderson, F. (1971). Method and preliminary result of estimation of biomass and primary production in south Swedish mixed deciduous wood-land. En: Duvigneaud, P.P (Ed.) Symposium on the Productivity of forest ecosystems. Paris, UNESCO.

Assmann, E. (1970). The principles of forest yields study. Pergamon Press, New York.

Balboa, M.A. (2005). Biomasa arbórea 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.

Belsey, D.A. (1991). Conditioning diagnostics, collinearity and weak data in regression. Wiley, New York.

Bermúdez, J. & Piñeiro, G. (2001). La biomasa forestal en Galicia. Situación actual y perspectivas de aprovechamiento. *Revista CIS-Madera* 5: 27-40.

Bermúdez, J. & Touza, M. (2000). Las cifras del Tercer Inventario Forestal de Galicia y su incidencia en la industria de la transformación de la madera. *Revista CIS-Madera* 4: 6-24.

Birk, E.M. & Turner, J. (1992). Response of flooded gum (*Eucalyptus grandis*) to intensive cultural treatments: biomass and nutrient content of eucalypt plantations and native forest. *Forest Ecology and Management* 47: 1-28.

Borders, B.E. (1989). System of equations in forest stand modelling. *Forest Science*. 35: 548-556.

Brañas, J., González-Río, F. & Merino, A. (2000). Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del Noroeste de la Península Ibérica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 9: 316-335.

Calvo de Anta, R. (1992). El eucalipto en Galicia. Sus relaciones con el medio natural. Universidad de Santiago de Compostela. A Coruña.

Chiyenda, S.S. & Kozak, A. (1984). Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. *Canadian Journal of Forest Research* 14: 441-446.

Cortez, N. & Madeira, M. (1998). The effect of *Eucalyptus globulus* plantations on soil nutrient status. XVI Congreso Mundial de la Ciencia del suelo. Montpellier, Francia.

Cortina, J., Vallejo, V.R. (1994). Effects of clearfelling on forest floor accumulation and litter decomposition in a radiata pine plantation. *Forest Ecology and Management* 70: 299-310.

Fernández López, A. (1982). Evaluación de la producción y productividad del monte bajo de *Eucalyptus globulus*. Publicaciones del Centro Forestal de Lourizán (Pontevedra).

Fisher, R.F. & Binkley, D. (2000). Ecology and Management of Forest Soils. John Wiley & Sons, New York.

- García, O. & Ruiz, F. (2003). A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management* 173(1-3): 49-62.
- González Río, F., López, J., Astorga, R., Castellanos, A., Fernández, O. & Gómez, C. (1997). Fertilización y control de la vegetación accesoria en plantaciones de eucalipto. *Comunicaciones II Congreso Forestal Español* 3: 271-276.
- Harvey, A.C. (1976). Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Hopmans, P., Steward, H.T.L. & Flinn, D.W. (1993). Impacts of harvesting on nutrients in a eucalypt ecosystem in southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 59: 29-51.
- Lemoine, B. (1969). Le pin Maritime dans les Landes de Gascogne. Etude des relations d'allométrie concernant le volume des peuplements, en liaison avec certaines caractéristiques de la station. *Annales des Sciences Forestières* 26: 445-473.
- Lemoine, B., Gelpe, J., Ranger, J., Nys, C. (1984). Biomasses et mineralomasses du Pin Maritime. Etude d'un peuplement de 16 ans. En: Auclair, D (Ed.) Mesures des biomasses et des accroissements forestiers. Proceedings, IUFRO s4.01.00 meeting, Orleans, France, 3-7 Oct. 1983. Colloques de l'INRA. 1983, publ. 1984, N° 19: 189-198, 7 ref.
- Lemoine, B., Gelpe, J., Ranger, J. & Nys, C. (1986). Biomasses et croissance du pin Maritime. Etude de la variabilité dans un peuplement de 16 ans. *Annales des Sciences Forestières* 43: 67-84.
- Montero, G., Ortega, C., Cañellas, I. & Bachiller, A. (1999). Productividad aérea y dinámica de nutrientes en una repoblación de *Pinus pinaster* Ait. sometida a distintos regímenes de claras. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. Fuera de Serie n° 1: 175-206.
- Newbould, P. (1970). Methods for estimating the primary production of forest. 2ª ed., Willmer Brothers limited Birkenhead. Londres.
- O'Connell, A.M. & Menagé, P.M.A. (1982). Litterfall and nutrient cycling in karri (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell.) forest in relation to stand age. *Australian Journal of Ecology* 7: 49-62.
- Pardé, J. (1980). Forest biomass. *Forestry Abstracts*. 41: 343-362.
- Parresol, B.R. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45: 573-593.
- Parresol, B.R. (2001). Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 865-878.
- Porté, A., Trichet, T., Bert, D. & Loustau, D. (2002). Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 158: 71-78.
- Salas González, R. (1995). Modélisation de l'évolution de la ressource du massif du pin Maritime (*Pinus pinaster*) des Landes de Gascogne. Doctorat Sciences Forestières. ENGREF, Nancy.
- SAS Institute Inc. (2000). SAS/ETS User's Guide Version 8, Cary, NC.
- Satoo, T. & Madgwick, H.A.I. (1982). Forest Biomass. Forestry Sciences. Kluwer Academic Publishers Group, Holanda.
- Spangenberg, A., Grimm, U., Sepeda da Sila, J.R. & Fölster, H. (1996). Nutrient store export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). *Forest Ecology and Management* 80: 225-234.
- Teller, A. (1988). Biomass, productivity and wood waste evaluation in a Spruce (*Picea abies*) forest (Strinchmps 983). *Commonwealth Forestry Review* 7: 129-148.
- Toval, G. & Vega, G. (1982). Metodología para la cuantificación del clima, primera aproximación de su aplicación en Galicia. Actas de la Reunión Técnica Principios de Investigación de Especies. Lourizán, 4-8 de octubre.
- Van Laar, A. & Akça, A. (1997). Forest Mensuration. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Vega, P., Vega, G., González, M. & Rodríguez, A. (1993). Mejora del *Pinus pinaster* Ait en Galicia. Ponencias y comunicaciones. I Congreso Forestal Español. Tomo II, 129-134.
- Xunta de Galicia (2001). O monte galego en cifras. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural.