

Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy species: a review

Ecuaciones alométricas de uso común para estimar biomasa en rebrotes de especies dendroenergéticas de corta rotación: una revisión

Julio Cesar Ríos-Saucedo^{1,3*}; Eduardo Acuña-Carmona¹; Jorge Cancino-Cancino¹; Rafael Rubilar-Pons¹; José de Jesús Navar-Chaidez²; Rigoberto Rosales-Serna³.

¹Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. Victoria núm. 631, Barrio Universitario, Concepción, Región del Biobío - Chile / Casilla 160-C. C.P. 4070386. Tel. Cel +56 9 74203583.

Email: j_riossaucedo@hotmail.com (*Corresponding author).

²Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. Edificio CEDES 4º Piso, Av. Eugenio Garza Sada núm. 2501 Sur Col. Tecnológico, C. P. 64849. Monterrey, Nuevo León, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango-Mezquitil, km. 4.5. C.P. 34000. Durango, Dgo., México.

Abstract

Wood energy crops in a short rotation coppice (SRC) commonly consist of single-stem tree individuals in the first short cycle, but from the second cycle onward numerous sprouts or shoots emerge from each stump, resulting in interesting challenges when estimating their biomass. The aim of this study was to identify species, rotation length and types of allometric models used to estimate biomass in SRC through a detailed search of the scientific journals in the Scopus and Web of Science databases. Among the most commonly used models to estimate biomass (y) is the typical exponential model, which has the following predictors: diameter at breast height (D) ($y = b_0 D^{b_1}$), stem basal diameter (Db) ($y = b_0 Db^{b_1}$) and the combination of diameter at breast height squared by total height (D^2H) ($y = b_0 + b_1 D^2H$), stands out. The genera with the largest number of different models were *Populus*, *Salix* and *Eucalyptus*. The first two are the most studied. The rotation length used in the crops studied ranged from one to 15 years.

Keywords: Woody crops, allometric model, bioenergy, Scopus, Web of Science.

Resumen

Los cultivos dendroenergéticos de corta rotación en monte bajo (Short Rotation Coppice -SRC) comúnmente están formados por individuos unifustales en el primer ciclo de corta, pero a partir del segundo ciclo, de cada cepa surgen numerosos vástagos o brotes, los cuales presentan desafíos interesantes al momento de estimar su biomasa. El objetivo de este trabajo fue identificar especies, longitud de rotación y tipos de modelos alométricos usados para estimar biomasa en SRC, en revistas científicas de las bases de datos Scopus y Web of Science. Entre los modelos para estimar la biomasa (y) de uso más frecuente destaca el exponencial, que tiene como variable predictora el diámetro normal (D) ($y = b_0 D^{b_1}$), diámetro basal de tallo (Db) ($y = b_0 Db^{b_1}$) y la combinación de diámetro normal al cuadrado por la altura total (D^2H) ($y = b_0 + b_1 D^2H$). Los géneros con mayor número de modelos diferentes fueron *Populus*, *Salix* y *Eucalyptus*. Los dos primeros son los más estudiados. La longitud de rotación empleada en los cultivos estudiados varió de uno a 15 años.

Palabras clave: Cultivos leñosos, modelos alométricos, bioenergía, Scopus, Web of Science.

Please cite this article as follows (APA 6): Ríos-Saucedo, J. C., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Navar-Chaidez, J. J., & Rosales-Serna, R. (2016). Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy species: a review. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 193-202. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.05.022



Introduction

Global demand for energy is growing steadily, resulting in higher prices for fossil fuels, which represent the most important input for the energy industry. Sustainable energy sources currently provide 19 % of global energy consumption, and of this amount 50 % is generated from the combustion of plant biomass (REN21, 2013).

Many woody species grown in short rotation coppices (SRC) have gained importance in the supply of plant biomass (Hoogwijk, Faaij, Eickhout, de Vries, & Turkenburg, 2005). Among the most important wood energy species worldwide are eucalyptus (*Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata*) (Camps & Marcos, 2002), willow (*Salix* spp.), poplar (*Populus* spp.) and acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon*, *A. retinodes*). These species have high productivity and can be promoted as fast-growing forest plants (Hoogwijk et al., 2005).

Evidence indicates that an important way to produce the biomass used in power generation is through the development of fast-growing plantations and short rotations. Interest in sprouting-generated stands lies mainly in the fact that they produce on average twice the volume of a sexual-regeneration stand in the first eight years (Sixto, Hernández, Barrio, Carrasco, & Cañellas, 2008).

Biomass estimation is usually done using allometric models based on diameter at breast height (D) and total tree height (H), and occasionally some tree form measurements are also used (Clutter, Fortson, Pienaar, Brister, & Bailey, 1983). Allometric models have been developed for use in wood energy species grown in Africa (Henry et al., 2011), Europe (Muukkonen & Mäkipää, 2006) and South America (Návar, 2009). These models are based on characteristics easily measured on single-stem trees, such as the variables diameter at breast height and plant height, which together with the basic wood density should be related to biomass production (Hauk, Knoke, & Wittkopf, 2014).

However, in wood energy crops only the first rotation is formed by single-stem trees. From the second rotation onwards, numerous shoots emerge from each stump, which presents difficulties for predicting the total biomass yield in the aboveground part and its components. Therefore, it was decided to conduct a literature review with the objective of identifying species, rotation length and types of allometric models used to estimate biomass in SRC. For this reason, a bibliographic compiling of scientific publications related to the use of species, rotation length and allometric models for estimating aboveground biomass in SRC was performed.

Introducción

La demanda mundial de energía crece de manera constante y esto propicia la escalada en el precio de los combustibles fósiles, los cuales representan el insumo más importante para la industria energética. En la actualidad, las fuentes de energía sostenible aportan 19 % del consumo energético mundial, y de esta cantidad el 50 % se genera a partir de la combustión de biomasa vegetal (REN21, 2013).

Numerosas especies leñosas cultivadas en turnos cortos (SRC) han adquirido importancia en la oferta de biomasa vegetal (Hoogwijk, Faaij, Eickhout, de Vries, & Turkenburg, 2005). Entre las especies dendroenergéticas más importantes a nivel mundial se encuentran el eucalipto (*Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata*) (Camps & Marcos, 2002), sauce (*Salix* spp.), álamo (*Populus* spp.) y acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon*, *A. retinodes*). Estas especies presentan una alta productividad y pueden promoverse como plantas forestales de rápido crecimiento (Hoogwijk et al., 2005).

La evidencia señala que una importante vía para producir la biomasa utilizada en la generación de energía, es a través del desarrollo de plantaciones de rápido crecimiento y rotaciones cortas. El interés en rodales de rebrotación radica principalmente en que producen en promedio el doble del volumen de un rodal de regeneración sexual en los primeros ocho años (Sixto, Hernández, Barrio, Carrasco, & Cañellas, 2008).

La biomasa se estima habitualmente mediante modelos alométricos basados en el diámetro normal (D) y la altura total del árbol (H), y en ocasiones también se utilizan algunas medidas de la forma de los árboles (Clutter, Fortson, Pienaar, Brister, & Bailey, 1983). Se han desarrollado modelos alométricos para su uso en especies dendroenergéticas cultivadas en África (Henry et al., 2011), Europa (Muukkonen & Mäkipää, 2006) y América del Sur (Návar, 2009). Dichos modelos están basados en características de fácil medición en árboles unifustales, como son las variables diámetro normal y altura de la planta, las cuales junto con la densidad de la madera deben relacionarse con la producción de biomasa (Hauk, Knoke, & Wittkopf, 2014). Sin embargo, en los cultivos dendroenergéticos sólo la primera rotación está formada por individuos monofustales. A partir de la segunda rotación surgen numerosos vástagos o rebrotes de cada tocón, lo cual presenta dificultades para la predicción del rendimiento de biomasa total en la parte aérea y sus componentes. Así surgió el interés por realizar una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar especies, longitud de rotación y tipos de modelos alométricos usados para estimar biomasa en SRC. Para esto se realizó una recopilación bibliográfica de publicaciones científicas, relacionadas con el uso de

Materials and methods

Creating the database

An online search was conducted of scientific journals included in the Scopus and Web of Science (WoS) databases. The review included all the recorded years of journals indexed in the two databases until April 2015. The general search criterion for the publications was short rotation coppice, and included the five following concepts: short rotation coppice (SRC), short rotation forestry (SRF), short rotation woody crops (SRWC), short rotation intensive culture (SRIC) and bioenergy crops (BC). These concepts were combined with the following five keywords: allometry, allometric, model, equation and partition, in order to increase the level of specificity in each of the five concepts related to the criterion of short rotation coppice.

Compilation and analysis of publications

All publications found for all possible combinations of the concepts and keywords were reviewed, excluding those publications that, despite matching the search criteria, lacked mathematical models for estimating biomass.

Documents obtained were exported to “EndNote X6” software, in order to join the two databases and remove duplicates automatically. The final database included only those publications in which the allometry mentioned was related to allometric models for estimating biomass produced by shoots in short rotation coppice systems.

Results and discussion

Using the criteria, concepts and simple and compound key words, defined for the study, 1,382 papers published between 1996 and 2015 were compiled. Most of the publications came from the Scopus database. The most frequently used concept was bioenergy crops, which allowed the identification of 492 publications (36 % of the total), of which 362 were obtained from the Scopus database and 130 from WoS. Another important concept was short rotation coppice, which recorded 420 publications (30 %), of which 282 were obtained from Scopus and 138 from WoS. The concepts that appeared with less frequency were short rotation forestry (260 publications), short rotation woody crops (140), short rotation intensive culture (42) and short rotation crops (28) (Table 1). The combination of the keyword (Model) with all concepts showed a greater record of publications in both databases (1,072 papers), but without the presence of allometric equations for estimating biomass (Table 1). After article purification, based on duplications and content type, only 65 publications that showed allometry aimed at

especies, longitud de rotación y modelos alométricos para estimar biomasa aérea en SRC.

Materiales y métodos

Creación de la base de datos

Se realizó la búsqueda en línea de las revistas científicas incluidas en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS). La revisión incluyó todos los años de registro de las revistas indexadas en las dos bases de datos hasta el mes de abril de 2015. El criterio general de la búsqueda de publicaciones fue *short rotation coppice* (monte bajo de corta rotación), y se incluyeron los siguientes cinco conceptos: *short rotation coppice* (SRC), *short rotation forestry* (SRF), *short rotation woody crops* (SRWC), *short rotation intensive culture* (SRIC) y *bioenergy crops* (BC). Estos conceptos se combinaron con las siguientes cinco palabras clave: *allometry*, *allometric*, *model*, *equation* y *partition*, con el fin de incrementar el nivel de especificidad en cada uno de los cinco conceptos relacionados con el criterio de monte bajo de corta rotación.

Recopilación y análisis de publicaciones

El número total de publicaciones encontradas para todas las posibles combinaciones de los conceptos y palabras clave fueron revisadas, excluyendo aquellas publicaciones que, a pesar de coincidir con los criterios de búsqueda, carecieron de modelos matemáticos para la estimación de biomasa.

Los documentos obtenidos se exportaron al software “EndNote X6”, con el fin de unir las dos bases de datos y eliminar los duplicados de manera automática. La base de datos final incluyó únicamente las publicaciones en las que la alometría estaba relacionada con modelos alométricos para la estimación de biomasa producida por los rebrotes en sistemas de monte bajo de corta rotación.

Resultados y discusión

Mediante el uso del criterio, conceptos y palabras clave simples y compuestas, definidos para el estudio, se recopilaron 1,382 artículos publicados entre 1996 y 2015. La mayor parte de las publicaciones provinieron de la base de datos Scopus. El concepto de uso más frecuente fue *bioenergy crops*, que permitió la identificación de 492 publicaciones (36 % del total), de las cuales 362 se obtuvieron de la base de datos Scopus y 130 de WoS. Otro concepto importante fue *short rotation coppice*, que registró 420 publicaciones (30 % del total); 282 se obtuvieron de Scopus y 138 en WoS. Los conceptos que presentaron menor frecuencia fueron *short rotation forestry* (260 publicaciones), *short rotation woody crops* (140), *short rotation intensive culture* (42) y *short rotation crops* (28) (Cuadro 1). La combinación de la palabra clave (*Model*) con todos los conceptos

Table 1. Number of publications compiled according to concept, keywords and database consulted.
Cuadro 1. Número de publicaciones recopiladas, según concepto, palabras clave y base de datos consultada.

Keyword/ Palabra clave	Concepts/Conceptos											
	SRC		SRF		SRWC		SRCR		SRIC		BC	
	Scopus	WoS	Scopus	WoS	Scopus	WoS	Scopus	WoS	Scopus	WoS	Scopus	WoS
Allometry/ Alométricas	20	4	10	7	7	0	1	0	0	0	8	0
Allometric/ Alométricas	22	11	17	12	7	5	2	1	2	0	4	1
Model/ Modelo	208	98	106	52	74	26	18	11	19	11	328	121
Equation/ Ecuación	31	17	32	16	14	2	1	0	5	2	20	3
Partition/ Partición	1	8	1	5	1	2	0	0	0	1	2	5

SRC: short rotation coppice, SRF: short rotation forestry, SRWC: short rotation woody crops, SRCR: short rotation crops, SRIC: short rotation intensive culture, BC: bioenergy crops.

estimating biomass were selected. Of these, 52 (82 %) were associated with the SRC concept and 13 (20 %) with the BC concept.

The 65 identified publications were examined in detail in order to select only those articles that explicitly showed models and variables for predicting shoot biomass in short rotation crops. Through this analysis only 25 publications were detected. Of these, a high number, 12 (48 %), were related to hybrid plantations of the genus *Populus*, which were established in countries such as Germany, Italy, Belgium, the Czech Republic, Denmark and France. The other publications were based on plantations of other plant genera, such as *Salix* (4 papers), established in Sweden, Denmark and Croatia, and *Eucalyptus* (2 papers) in Madagascar and France. There were also individual publications on mixed cultures of the genera *Populus-Salix* (Czech Republic), *Liquidambar-Platanus* (Georgia), *Acer-Populus* (Belgium), *Alnus-Betula* (Estonia), *Daniellia* (Benin), *Platanus* (USA) and *Robina* (Germany).

The genus *Populus* was the most common in the studies that generated allometric models to estimate aboveground shoot biomass (Table 2). Other plant genera important in developing SRC models are *Salix* and *Eucalyptus*. The studies were carried out with different clones, interspecific hybrids and a rotation length from one to 15 years.

The rotation length used in the crops studied is very variable; in seven studies conducted with different plant genera, biomass was estimated at only a single rotation, as was the case of *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Daniellia*, *Liquidambar* and two in *Platanus*. Most of these were evaluated at age eight, except for *Acer* (4 years) and

mostró mayor registro de publicaciones en ambas bases de datos (1,072 artículos), pero sin presencia de ecuaciones alométricas para estimar biomasa (Cuadro 1). Después de la depuración de artículos, con base en duplicaciones y tipo de contenido, se seleccionaron solo 65 publicaciones que mostraron la alometría de forma dirigida a la estimación de biomasa, de éstas, 52 (82 %) asociadas al concepto SRC, y 13 (20 %) a BC.

Las 65 publicaciones identificadas se examinaron en forma detallada, para seleccionar únicamente aquellos artículos que mostraron explícitamente modelos y variables para predecir la biomasa de rebrotes en cultivos de corta rotación. Mediante ese análisis se detectaron solo 25 publicaciones. De estas, una alta cantidad 12 (48 %) se relaciono con plantaciones de híbridos del género *Populus*, establecidas en países como Alemania, Italia, Bélgica, República Checa, Dinamarca y Francia. El resto de las publicaciones se generaron en plantaciones de otros géneros vegetales, como *Salix* (4 artículos), en Suecia, Dinamarca y Croacia, *Eucalyptus* (2 artículos) en Madagascar y Francia, también publicaciones individuales en cultivos mixtos de los géneros *Populus-Salix* (República Checa), *Liquidambar-Platanus* (Georgia), *Acer-Populus* (Bélgica), *Alnus-Betula* (Estonia), *Daniellia* (Benín), *Platanus* (EUA) y *Robina* en Alemania.

El género *Populus* fue el más frecuente en los estudios que generaron modelos alométricos para estimar biomasa aérea en rebrotes (Cuadro 2). Otros géneros vegetales importantes en desarrollo de modelos en SRC, son *Salix* y *Eucalyptus*. Las investigaciones fueron realizadas con diferentes clones, híbridos interespecíficos y longitud de rotación desde uno hasta 15 años.

Daniellia (3 years). However, the genus *Eucalyptus*, reported in two studies, showed greater assessment variability over time (1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14 and 15 years), followed by the genera *Robina* (2, 3, 4 and 14 years), *Populus* (3, 4 and 8 years) and *Salix* (1, 2, 4 and 6 years) (Figure 1).

It was found that different models are applied to estimate biomass in tree species from short rotation crops (Table 2), established mainly in the continents of Europe, Africa and North America, among which the typical exponential model $y = b_0 D^{b_1}$, tested in most species studied, except *Eucalyptus*, *Alnus*, *Betula* and *Liquidambar*, stands out. This model was used by Laureysens, Bogaert, Blust, and Ceulemans (2004), Liberloo et al. (2005), Liberloo et al. (2006), Rock (2007), Röhle, Hartmann, Gerold, Steinke, and Schröder (2006), Vande Walle, Van Camp, Van de Castele, Verheyen and Lemeur (2007), Al Afas, Marron, Van Dongen, Laureysens, and Ceulemans (2008), Fajman, Palát, and Sedlák (2009), Avohou, Houehounha, Glele-Kakai, Assogbadjo, and Sinsin (2011), Fischer, Trnka, Kučera, Fajman, and Žalud (2011), Sevel, Nord-Larsen, and Raulund-Rasmussen (2012) and Mugasha et al. (2013), where some researchers measured each shoot as a single stem and others performed pruning on the stump, leaving one or two shoots, measuring stem diameter (D) at different heights depending on the species studied, in order to find the best model fit and thereby increase the level of correlation and accuracy of the estimates, which showed coefficients of determination (R^2) greater than 0.85.

In willow (*Salix*), the biomass values obtained with the destructive method and those estimated with allometric equations (non-destructive) were compared. It was concluded that the exponential model $y = b_0 D^{b_1}$ was efficient and can be used in commercial willow plantations for estimating aboveground shoot biomass. Based on the results, the height with the greatest coefficient of determination was obtained by measuring the diameter of the stem at 105 cm ($R^2\text{-adj} \geq 0.99$), although heights of 85 and 55 cm (both with $R^2\text{-adj} \geq 0.97$) also showed acceptable prediction values and can be thus used when the crop is in its initial stage of development and has not reached one meter high. In *Populus*, Guidi, Piccioni, Ginanni and Bonari (2008) validated the exponential model to estimate the production of woody biomass and the amount of bark on the stem, based on its diameter at breast height (D), efficiently estimating the amount of total biomass with and without bark, as the best relationship between stem diameter and tree biomass.

The typical exponential model $y = b_0 \chi^{b_1}$ has been modified based on the results of different studies aimed at determining biomass with allometric relationships at different diameters (D), basal diameter (Db) and total

La longitud de rotación empleada en los cultivos estudiados es muy variable. En siete estudios realizados con diferentes géneros vegetales se estimó la biomasa a una sola rotación, como fue el caso de *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Daniellia*, *Liquidambar* y dos en *Platanus*. La mayoría fueron evaluados a los ocho años, a excepción de *Acer* (4 años) y *Daniellia* (3 años). Por otra parte, el género *Eucalyptus*, reportado en dos estudios, mostró mayor variabilidad de evaluación en el transcurso del tiempo (1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14 y 15 años), le siguieron los géneros *Robina* (2, 3, 4 y 14 años), *Populus* (3, 4 y 8 años) y *Salix* (1, 2, 4 y 6 años) (Figura 1).

Se identificó la aplicación de diferentes modelos para estimar la biomasa en especies arbóreas a partir de cultivos de corta rotación (Cuadro 2), establecidos principalmente en los continentes de Europa, África y Norte de América, de los que sobresale el modelo típico exponencial $y = b_0 D^{b_1}$, probado en la mayoría de las especies estudiadas, con excepción de *Eucalyptus*, *Alnus*, *Betula* y *Liquidambar*. Este modelo fue utilizado por Laureysens, Bogaert, Blust, y Ceulemans (2004), Liberloo et al. (2005), Liberloo et al. (2006), Rock (2007), Röhle, Hartmann, Gerold, Steinke, y Schröder (2006), Vande Walle, Van Camp, Van de Castele, Verheyen, y Lemeur (2007), Al Afas, Marron, Van Dongen, Laureysens, y Ceulemans (2008), Fajman, Palát y Sedlák (2009), Avohou, Houehounha, Glele-Kakai, Assogbadjo, y Sinsin (2011), Fischer, Trnka, Kučera, Fajman, y Žalud (2011), Sevel, Nord-Larsen, y Raulund-Rasmussen (2012) y Mugasha et al. (2013), Algunos de estos investigadores midieron cada vástago como un solo tallo y otros realizaron podas en la cepa o tocón, dejando uno o dos vástagos, midiendo el diámetro del tallo (D) a diferentes alturas según la especie estudiada, con el propósito de encontrar el mejor ajuste del modelo y con ello incrementar el nivel de correlación y precisión de las estimaciones, lo cual mostró coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.85.

En los estudios de sauce (*Salix*), los valores de biomasa obtenidos con el método destructivo se compararon con aquellos estimados con ecuaciones alométricas (no destructivo). Se concluyó que el modelo exponencial $y = b_0 D^{b_1}$ fue eficiente y puede utilizarse en plantaciones comerciales de sauce para la estimación de biomasa aérea en rebrotes. Con base en los resultados, la altura con mayor coeficiente de determinación se obtuvo al medir el diámetro del tallo a los 105 cm ($R^2\text{-adj} \geq 0.99$), aunque a la altura de 85 y 55 cm ($R^2\text{-adj} \geq 0.97$) también mostraron valores aceptables de predicción, pudiendo ser utilizados cuando el cultivo está en su etapa inicial de desarrollo y no alcance el metro de altura. En *Populus*, Guidi, Piccioni, Ginanni y Bonari (2008) validaron el modelo exponencial para estimar la producción de biomasa leñosa y cantidad de corteza en el tallo, con base en el diámetro normal 1.30 m (D), estimando de manera eficiente la cantidad de biomasa total con

Table 2. Allometric models used in published articles, rotation length, plant genera, countries and source.
Cuadro 2. Modelos alométricos utilizados en artículos publicados, longitud de rotación, géneros vegetales, países y fuente.

Model/Modelo	Genus/Género	Rotation length by year/Longitud de rotación por año	Country/País	Source/Fuente	
$y = b_0 D^{b_1}$	<i>Acer, Salix, Populus</i>	4	Belgium	Vande Walle, Van Camp, Van de Casteele, Verheyen, and Lemeur (2007)	
	<i>Populus</i>	4	Belgium	Laureysens, Bogaert, Blust, & Ceulemans (2004)	
	<i>Populus</i>	3	Italy	Liberloo et al. (2005)	
	<i>Populus</i>	3	Italy	Liberloo et al. (2006)	
	<i>Populus</i>	2	Italy	Guidi, Piccioni, Ginanni, and Bonari (2008)	
	<i>Populus</i>	2 and 3	Belgium	Al Afas, Marron, Van Dongen, Laureysens, and Ceulemans (2008)	
	<i>Populus</i>	8	Germany	Rock (2007)	
	<i>Populus</i>	8	Tanzania	Mugasha et al. (2013)	
	<i>Populus</i>	8	Czech Republic	Fischer, Trnka, Kučera, Fajman, and Žalud (2011)	
	<i>Populus-Salix</i>	7	Czech Republic	Fajman, Palát, and Sedlák (2009)	
$y = b_0 + b_1 D^{b_2} H$	<i>Salix</i>	2 and 3	Denmark	Sevel, Nord-Larsen, and Raulund-Rasmussen (2012)	
	<i>Alnus, Betula</i>	8	Estonia	Uri, Aosaar, Varik, and Kund (2010)	
	<i>Liquidambar-Platanus</i>	8	Georgia	Allen, Will, and Jacobson (2005)	
	<i>Populus</i>	3	Belgium-France	Herve and Ceulemans (1996)	
	$y = b_0 + b_1 D^{b_2}$	<i>Salix</i>	2	Sweden	Telenius (1999)
		<i>Salix</i>	2	Croatia	(Bogdan, Kajba, & Katičić, 2006)
	$y = b_0 D^{b_1}$ $y = b_0 + b_1 D^{b_2} H$	<i>Daniellia</i>	3	Benin	Avohou, Houehounha, Glele-Kakai, Assogbadjo, and Sinsin (2011)
		$\ln y_{agb} = b_0 + b_1 \ln(Db_1)$ $\ln y_{agb} = b_0 + b_1 \ln(Cir_i)$ $y = b_0 + (b_1 + b_2 T) \cdot D^{b_3}$ $y = b_0 + b_1 D + b_2 T$ $y = b_0 D^{b_1} + b_2 \ln(T)$ $y = \frac{b_0 + b_1 D \cdot 100}{b_2 + D \cdot 100} + D \cdot T$ $y = b_0 + D^{b_1} + b_2 \ln(T)$ $y = b_0 D^{b_1}$ $y = b_0 + b_1 D + b_2 D^2$ $y = b_0 D^{b_1}$ $y = b_0 e^{b_1 D}$ $y = b_0 + b_1 D + b_2 e^{b_2 D} + b_3 e^{H/D}$ $y = b_0 + b_1 D H$ $y = b_0 D^{b_1} H^{b_2}$	<i>Eucalyptus</i>	3 and 5	Madagascar
	<i>Eucalyptus</i>		1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14 and 15	France	
	<i>Platanus</i>		7	United States	Davis and Trettin (2006)
<i>Populus</i>	4		Germany	Röhle, Hartmann, Gerold, Steinke, and Schröder (2006)	
$\ln y = \ln(b_0) + b_1 \ln(D)$ $\hat{y}_{fc} = \hat{b}_0 D^{\hat{b}_1} \cdot FC$ $FC = e^{0.5 \hat{\alpha}^2}$	<i>Populus</i>		3	Germany	Morhart, Sheppard, and Spiecker (2013)
$y = b_0 + b_1 D^{b_2}$ $y = b_0 + b_1 D^{b_2} H^{b_3}$ $y = b_0 + b_1 D + b_2 D^2 H_m$ $y = b_0 + b_1 D_m^{b_2} + b_3 D^2 H_m$	<i>Populus</i>		8	France	Brahim, Gavaland, and Cabanettes (2000)

Continues /Continúa

$\ln y + \ln(b_0) + b_1 \ln(D)$	<i>Robina</i>	2, 3, 4 and 14	Germany	Böhm, Quinkenstein, and Freese (2011)
$y = b_0 + b_1 D^{b_2}$	<i>Salix</i>	1, 2 and 10	Sweden	Verwijst and Telenius (1999)
$y = (b_0 + b_1 T + b_2 T^2) D^{b_3}$				

y : total biomass, D : diameter at breast height, H : height, T : (days), Dbi : Basal diameter of all shoots, \ln : natural logarithm, $Ciri$: stump circumference, agb : aboveground biomass, gbg : below-ground biomass, b_0, b_1, b_2, b_3 : model parameters, FC : correction factor, Hm : average height, Dm : average diameter.

y : biomasa total, D : diámetro normal, H : altura, T : (días), Dbi : Diámetro basal de todos los vástagos o brotes, \ln : logaritmo natural, $Ciri$: circunferencia de la cepa, agb : biomasa por encima del suelo, gbg : biomasa por debajo del suelo, b_0, b_1, b_2, b_3 : parámetros del modelo, FC : factor de corrección, Hm : altura media, Dm : diámetro medio.

height (H), used as predictive variables (X) of the regression model. For example, Böhm, Quinkenstein, and Freese (2011), in *Robinia pseudoacacia* plantations, developed allometric equations to predict biomass based on basal diameter times total height (DbH). These equations were considered sufficiently accurate to estimate the woody biomass of the aboveground part of this species.

Other predictors frequently used in the models to estimate shoot biomass of the species studied are the natural logarithm of the diameter at breast height ($\ln D$), diameter squared times height (D^2H) and the ratio (D/H), which range between three and four regression parameters.

On the other hand, Verwijst and Thelonius (1999) fitted the exponential model onto five different dates during the first growing season in *Salix*. Then they fitted the model intercept and determined the evolution of the slope (b_1, b_2) over the course of time T . The resulting model is $y = (b_0 + b_1 T + b_2 T^2) D^{b_3}$. T is expressed in relative terms and varies between 0 and 1, and D is the diameter at breast height. With this a coefficient of determination of $R^2 = 0.99$ is obtained (Table 2).

The linearized exponential model was one of the models studied in SRC. Morhart, Sheppard, and Spiecker (2013) evaluated in *Populus maximowiczii* × *P. trichocarpa* (hybrid 275) the logarithmic or linearized model $\ln y = \ln(b_0) + b_1 \ln(D)$, but according to Finney (1941) the result of transforming back the mean of the logarithms is to obtain the geometric mean of the original sample, which tends to underestimate the arithmetic mean of the population. Therefore, to correct the bias introduced into the model, they used the multiplicative correction factor ($FC = e^{0.5\sigma^2}$). After applying the factor (FC), they used the model $\hat{y} = \hat{b}_0 D^{b_1} FC$ to return to their original measurement scale. The adjusted coefficients of determination in the estimate (R^2 -adj) were 0.99 for the production of aboveground biomass in stems and leaves, while for branches a value of 0.98 was obtained. The researchers concluded that the proposed model, which uses diameter at breast height (D) as a predictor, provides an efficient and simple way to estimate aboveground biomass. Razakamanarivo, Razakavololona, Razafindrakoto, Vieilledent, and Albrecht (2012) also evaluated the linearized model to estimate aboveground and root biomass in *Eucalyptus*

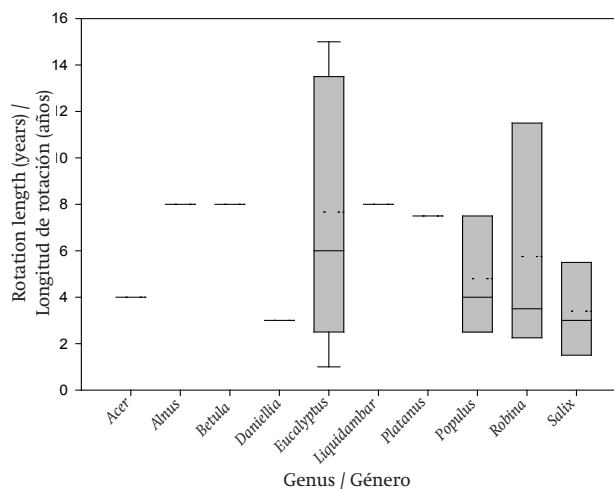


Figure 1. Rotation length per genus recorded in each study. The dashed line represents the average age, the continuous line the median age, the ends of the columns the quartiles of 25 and 75 %, and the error bars the standard deviation of the data.

Figura 1. Longitud de rotación por género registrada en cada estudio. La línea segmentada representa la edad promedio; la línea continua la mediana; los extremos de las columnas, los cuartiles del 25 y 75 %; y las barras de error, la desviación estándar de los datos.

corteza y sin corteza, como la mejor relación entre el diámetro del tallo y la biomasa del árbol.

El modelo típico exponencial $y = b_0 \chi^{b_1}$ se ha modificado con base en los resultados de diferentes estudios encaminados a determinar la biomasa con relaciones alométricas a diferentes diámetros (D), diámetro basal (Db) y altura total (H), utilizadas como variables predictoras (X) del modelo de regresión. Por ejemplo, Böhm, Quinkenstein, y Freese (2011), en plantaciones de *Robinia pseudoacacia*, desarrollaron ecuaciones alométricas para predecir biomasa basadas en el diámetro basal y altura total (DbH). Dichas ecuaciones se consideraron suficientemente precisas para estimar la biomasa leñosa de la parte aérea en esta especie.

Otras de las variables predictoras frecuentemente utilizadas en los modelos para estimar biomasa en rebrotes de las especies de estudio son el logaritmo

robusta, but with a different predictor $\ln y_{agb} = b_0 + b_1 \ln(Db_1)$, where (y_{agb}) is the aboveground biomass and (Db_1) is stem basal diameter. For root biomass, they replaced within the model the dependent variable (y_{bgb}) belowground biomass and stump circumference (Cir_1) as the predictor variable. For correction of the logarithmic transformation bias, they applied the correction factor proposed by (Finney, 1941) (Table 2). Razakamanarivo et al. (2012) concluded that the evaluated model can be used to estimate aboveground and belowground biomass in *E. robusta*, using basal area and stump circumference respectively.

Brahim, Gavaland, and Cabanettes (2000) tested four generalized allometric regression equations to estimate the aboveground biomass in individual *Populus* trees. It was noted that the residual sums of squares were not significantly different when analyzing at site level, with a value for the coefficient of determination R^2 higher than 0.94. The four models were acceptable for fitting the biomass estimate at site level, although it was established that the first three models tend to overestimate values when doing the analysis with all sites. Only the model $y = b_0 + b_1 D_m^2 + b_3 D^2 H_m$ showed significance with an R^2 of 0.98 in estimating biomass in the combination of all sites, using as predictors the mean diameter (D_m) and diameter squared by mean total height ($D^2 H_m$) (Table 2). Results showed that the generalized regression with four parameters was sufficient to accurately estimate the aboveground biomass of trees grown at all sites.

Conclusions

In the compilation and descriptive analysis of scientific papers related to the use of allometric models for wood energy plantation shoots, the main plant species, rotations, methods and techniques used in estimating biomass in the SRC system were identified. In these papers the most frequently used genera are *Populus*, *Salix* and *Eucalyptus*. Most data sets in this analysis highlighted the exponential model, with different predictor variables, among which diameter at breast height (D), total height (H) and basal diameter (Db) were preponderant. Rotation length is highly variable from one to 15 years, mainly attributed to the geographical area and quality of the site where the crops were established.

natural del diámetro normal ($\ln D$), diámetro al cuadrado por la altura ($D^2 H$) y diámetro sobre altura (D/H), que varían entre tres y cuatro parámetros de regresión.

Por otra parte Verwijst y Telenius (1999) ajustaron el modelo exponencial en cinco fechas diferentes durante la primera estación de crecimiento en *Salix*. Después fijan el intercepto del modelo y determinan la evolución de la pendiente (b_1, b_2) en el transcurso del tiempo T . De lo anterior, resulta el modelo $y = (b_0 + b_1 T + b_2 T^2) D^{b_3}$. T se expresa en términos relativos y varía entre 0 y 1, y D es el diámetro normal, con el cual se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.99$ (Cuadro 2).

El modelo exponencial linealizado fue otro de los modelos estudiados en SRC. Morhart, Sheppard, y Spiecker (2013) evaluaron el modelo logarítmico o linealizado $\ln y = \ln(b_0) + b_1 \ln(D)$ en *Populus maximowiczii* × *P. trichocarpa* (híbrido 275), pero de acuerdo con Finney (1941) al momento de linealizar se obtiene la media geométrica de la muestra original, lo cual tiende a subestimar la media aritmética de la población. Por lo tanto, para corregir el sesgo introducido en el modelo, los autores utilizaron el factor de corrección multiplicativo ($FC = e^{0.53}$). Después aplicando el factor (FC), usaron el modelo $\hat{y} = b_0 D^{b_1} FC$, para regresar a su escala original de medición. Los coeficientes de determinación ajustados en la estimación (R^2 -adj) fueron de 0.99 para la producción de biomasa aérea en tallos y hojas, mientras que para ramas se obtuvo un valor de 0.98. Los investigadores concluyeron que el uso del modelo propuesto, el cual usa el diámetro normal (D) como variable predictiva, es eficiente y sencillo para estimar la biomasa aérea. Razakamanarivo, Razakavololona, Razafindrakoto, Vieilledent, y Albrecht (2012) también evaluaron el modelo linealizado para estimar biomasa aérea y radicular en *Eucalyptus robusta*, pero con diferente variable predictor $\ln y_{agb} = b_0 + b_1 \ln(Db_1)$, donde (y_{agb}) es la biomasa sobre el suelo y (Db_1) es diámetro basal del tallo. Para la biomasa en raíz sustituyeron dentro del modelo la variable dependiente (y_{bgb}) biomasa subterránea y circunferencia de la cepa (Cir_1) como variable predictor. Para la corrección de sesgo de la transformación logarítmica, aplicaron el factor de corrección propuesto por Finney (1941) (Cuadro 2). Razakamanarivo et al. (2012) concluyeron que el modelo evaluado puede utilizarse para estimar la biomasa aérea y subterránea en *E. robusta*, mediante el uso del área basal y la circunferencia de la cepa respectivamente.

Brahim, Gavaland, y Cabanettes (2000) probaron cuatro ecuaciones de regresión alométrica generalizadas para estimar la biomasa aérea en árboles individuales de *Populus*. Se observó que las sumas de cuadrados residuales no fueron significativamente diferentes al hacer el análisis a nivel de sitio, con un valor de

End of English version

References / Referencias

- Al Afas, N. A., Marron, N., Van Dongen, S., Laureysens, I., & Ceulemans, R. (2008). Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management*, 255(5-6), 1883-1891.
- Allen, C. B., Will, R. E., & Jacobson, M. A. (2005). Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. *Forest Science*, 51(6), 556-569.
- Avohou, T. H., Houehounha, R., Glele-Kakai, R., Assogbadjo, A. E., & Sinsin, B. (2011). Firewood yield and profitability of a traditional *Daniellia oliveri* short-rotation coppice on fallow lands in Benin. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 562-571. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.10.030
- Bogdan, S., Kajba, D., & Katičić, I. (2006). Biomass production in willow clonal tests on marginal sites in Croatia. *South-east European forestry*, 5(2), 261-275.
- Böhm, C., Quinkenstein, A., & Freese, D. (2011). Yield prediction of young black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) plantations for woody biomass production using allometric relations. *Annals of Forest Research*, 54(2), 215-227.
- Bouvet, A., Nguyen-The, N., & Melun, F. (2013). Nutrient concentration and allometric models for hybrid eucalyptus planted in France. *Annals of Forest Science*, 70(3), 251-260. doi: 10.1007/s13595-012-0259-3
- Brahim, M. B., Gavaland, A., & Cabanettes, A. (2000). Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(2), 171-176.
- Camps, Manuel, & Marcos, Francisco. (2002). *Los biocombustibles*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Clutter, Jerome L., Fortson, James C., Pienaar, Leon V., Brister, Graham H., & Bailey, Robert L. (1983). *Timber management: a quantitative approach*: John Wiley & Sons, Inc.
- Davis, A. A., & Trettin, C. C. (2006). Sycamore and sweetgum plantation productivity on former agricultural land in South Carolina. *Biomass and Bioenergy*, 30(8-9), 769-777.
- Fajman, M., Palát, M., & Sedlák, P. (2009). Estimation of the yield of poplars in plantations of fast-growing species within current results. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 57(2), 25-36.
- Finney, D. J. (1941). On the distribution of a variate whose logarithm is normally distributed. *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society*, 155-161.
- Fischer, M., Trnka, M., Kučera, J., Fajman, M., & Žalud, Z. (2011). Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (*Populus nigra* × *P. maximowiczii*) in the conditions of Czech Moravian Highlands. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 59(6), 141-152. doi: 10.1029/2007JG000663
- Guidi, W., Piccioni, E., Ginanni, M., & Bonari, E. (2008). Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass & Bioenergy*, 32(6), 518-524. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.11.012
- Hauk, Sebastian, Knoke, Thomas, & Wittkopf, Stefan. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.103
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R. J., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: A review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45(3), 477-569.
- Herve, C., & Ceulemans, R. (1996). Short-rotation coppiced vs non-coppiced poplar: A comparative study at two different field sites. *Biomass and Bioenergy*, 11(2-3), 139-150.
- Hoogwijk, Monique, Faaij, André, Eickhout, Bas, de Vries, Bert, & Turkenburg, Wim. (2005). Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 29(4), 225-257. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.05.002
- Laureysens, I., Bogaert, J., Blust, R., & Ceulemans, R. (2004). Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management*, 187(2-3), 295-309. doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.005
- Liberloo, M., Calfapietra, C., Lukac, M., Godbold, D., Luo, Z.

Conclusiones

En la recopilación y análisis descriptivo de artículos científicos relacionados con modelos alométricos en rebrotes de plantaciones dendroenergéticas, se pudieron identificar las principales especies vegetales, rotaciones, métodos y técnicas utilizadas en la estimación de biomasa en el sistema SRC. En dichos artículos se utilizó con mayor frecuencia los géneros *Populus*, *Salix* y *Eucalyptus*. En la mayoría de los conjuntos de datos destacó el modelo exponencial con diferentes variables predictoras, entre las cuales el diámetro normal (D), altura total (H) y el diámetro basal (Db) resultaron preponderantes. La longitud de rotación es muy variable de uno a 15 años, atribuido principalmente a la zona geográfica y calidad de sitio donde los cultivos fueron establecidos.

Fin de la versión en español

- B., Polle, A., . . . Ceulemans, R. (2006). Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future high CO₂ world. *Global Change Biology*, 12(6), 1094-1106. doi: 10.1029/2003GB002127
- Liberloo, M., Dillen, S. Y., Calfapietra, C., Marinari, S., Zhi, B. L., De Angelis, P., & Ceulemans, R. (2005). Elevated CO₂ concentration, fertilization and their interaction: Growth stimulation in a short-rotation poplar coppice (EUROFACE). *Tree Physiology*, 25(2), 179-189.
- Morhart, C., Sheppard, J., & Spiecker, H. (2013). Above ground leafless woody biomass and nutrient content within different compartments of a *P. maximowiczii* x *P. trichocarpa* poplar clone. *Forests*, 4(2), 471-487. doi: 10.3390/f4020471
- Mugasha, Wilson Ancelm, Eid, Tron, Bollandsås, Ole Martin, Malimbwi, Rogers Ernest, Chamshama, Shabani Athumani Omari, Zahabu, Eliakimu, & Katani, Josiah Zephania. (2013). Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310, 87-101.
- Muukkonen, P., & Mäkipää, R. (2006). Erratum: Biomass equations for European trees: Addendum (*Silva Fennica* (2005) 4 (63)). *Silva Fennica*, 40(4), 763-773.
- Návar, José. (2009). Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science*, 66(2), 208-208. doi: 10.1051/forest/2009001
- Razakamanarivo, R. H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M. A., Vieilledent, G., & Albrecht, A. (2012). Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass & Bioenergy*, 45, 1-10. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.020
- REN21. (2013). *Renewables 2013 Global Status Report*. Paris, Francia: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).
- Rock, J. (2007). Suitability of published biomass equations for aspen in Central Europe - Results from a case study. *Biomass & Bioenergy*, 31(5), 299-307. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.003
- Röhle, H., Hartmann, K. U., Gerold, D., Steinke, C., & Schröder, J. (2006). Biomass functions for short rotation forestry. *Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände*, 177(10-11), 178-187.
- Sevel, L., Nord-Larsen, T., & Raulund-Rasmussen, K. (2012). Biomass production of four willow clones grown as short rotation coppice on two soil types in Denmark. *Biomass and Bioenergy*, 46, 664-672.
- Sixto, H, Hernández, M.J., Barrio, M, Carrasco, J, & Cañellas, I. (2008). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems*, 16(3), 277-294.
- Telenius, B. F. (1999). Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 16(1), 13-23. doi: 10.1016/s0961-9534(98)00073-7
- Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., & Kund, M. (2010). The growth and production of some fast growing deciduous tree species stands on abandoned agricultural land. *Forestry Studies*, 52, 18-29.
- Vande Walle, I., Van Camp, N., Van de Castele, L., Verheyen, K., & Lemeur, R. (2007). Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I-Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy*, 31(5), 267-275.
- Verwijst, T., & Telenius, B. (1999). Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management*, 121(1-2), 137-146. doi: 10.1016/s0378-1127(98)00562-3