



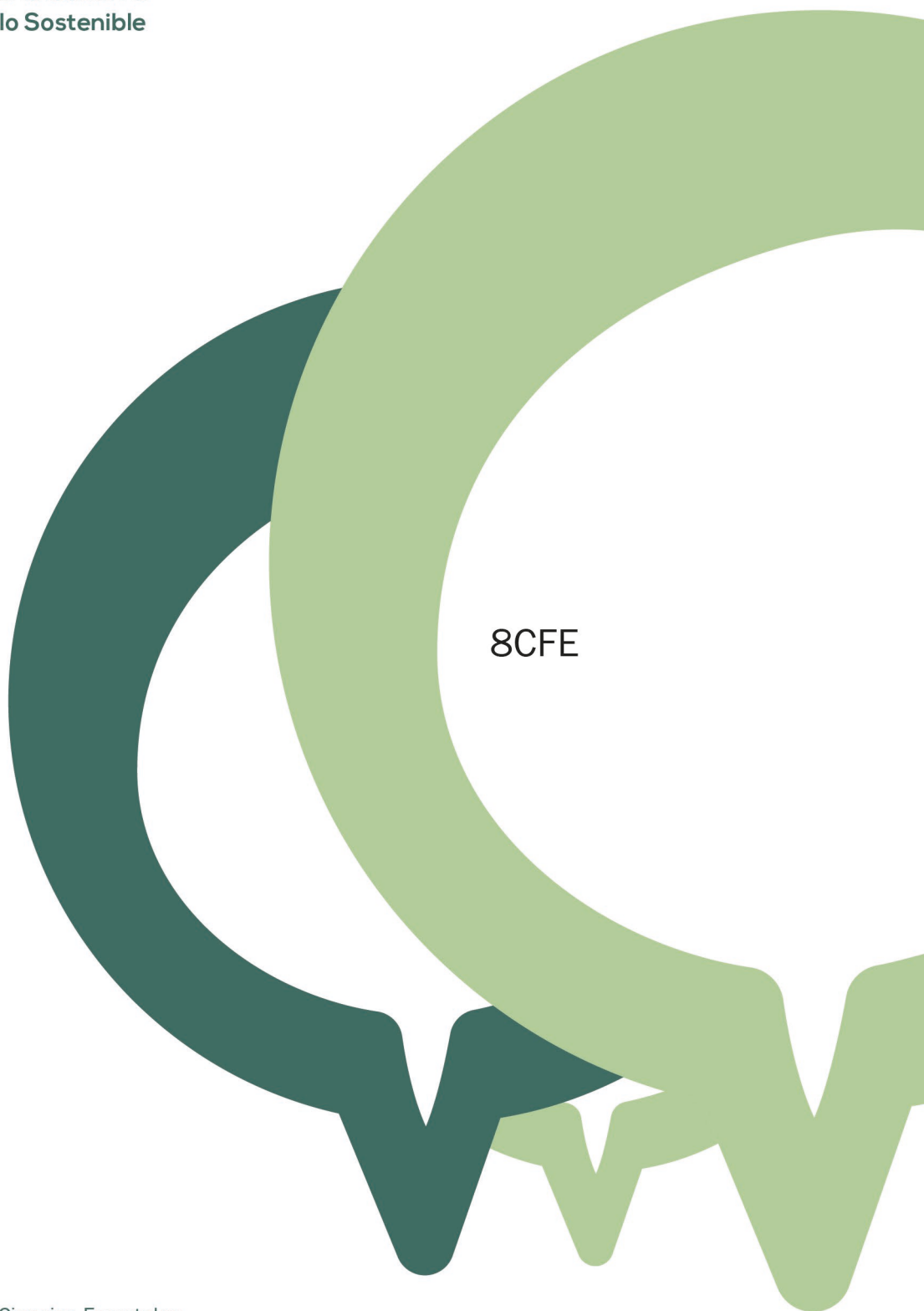
2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

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

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Tarifas de biomasa para plantaciones de turno corto de *Salix* spp. en Galicia

PÉREZ LÓPEZ, C.¹, ROJO ALBORECA, A.¹ y ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.¹

¹ Unidade de Xestión Ambiental e Forestal Sostible (UXAFORES). Departamento de Enxeñaría Agroforestal. Escola Politécnica Superior de Enxeñaría. Universidade de Santiago de Compostela.

Resumen

Se presentan las primeras tarifas simples de una y dos entradas, a partir del ajuste del modelo alométrico de una y dos variables, y sistemas de ecuaciones compatibles para la estimación de la biomasa aérea seca de árbol individual para plantaciones de *Salix* spp., clon Terranova, en turnos de corta rotación y altas densidades con fines energéticos en Galicia. Se parte de tres parcelas de ensayo con distintas densidades (10.000 y 7.353 pies/ha) y distintos tratamientos durante el primer ciclo de crecimiento (diferentes edades de los brotes y recepes en los inventarios), instaladas en dos municipios de A Coruña (Mesía y San Sadurniño). Los mejores resultados se obtuvieron, tanto en las tarifas simples como en los sistemas de ecuaciones compatibles, al utilizar como variables independientes el diámetro normal y el diámetro en la base de los brotes.

Palabras clave

Sauce, cultivos energéticos, recepe, ajuste simultáneo, ecuaciones compatibles.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, las crisis del petróleo y el cambio climático global han aumentado el interés por la biomasa, de tal manera que actualmente es el recurso renovable más utilizado y una de las fuentes energéticas con mayor potencial de crecimiento durante las próximas décadas (DURÁN et al., 2014).

Por esa razón, ha aumentado paralelamente el interés por las plantaciones forestales energéticas bajo una silvicultura intensiva de turno corto, SRC (*Short Rotation Coppice*) o SRF (*Short Rotation Forestry*), que se espera puedan ser, en un futuro cercano, una de las fuentes más importantes de biomasa para energía. La FAO denomina SRF a las plantaciones de alta densidad de especies arbóreas de crecimiento rápido que producen biomasa leñosa en tierras agrícolas o en tierras forestales fértiles pero degradadas (CHRISTERSSON & VERMA, 2006). Entre las múltiples ventajas de este tipo de sistemas destacan el amplio abanico de tierras en los que se pueden instalar, incluyendo las tierras marginales (BROECKX et al., 2012). Además, el uso de SRF en terrenos pobres aporta una mejora en la calidad y protección del suelo y en la biodiversidad a largo plazo (ZURBA et al., 2013).

El aprovechamiento de la biomasa residual y de cultivos de turno corto aparece como una oportunidad para desarrollar un sector innovador de gran potencial en España y en Galicia, con importantes retos y oportunidades, siendo la logística del aprovisionamiento la clave para garantizar la rentabilidad de este emergente sector. Asimismo, la elección de las especies, variedades y sistemas de aprovechamiento más adecuados son todavía una asignatura pendiente.

Son varias las especies utilizadas habitualmente para plantaciones energéticas, entre las que destacan las de los géneros *Populus*, *Salix* y *Eucalyptus*, pero además se han utilizado otras (HOOGWIJK et al., 2005; LUND et al., 2016). El género *Salix* (sauces), dentro de la familia Salicaceas, incluye especies de porte arbóreo o arbustivo propios de ambientes riparios o suelos encharcados, que pueden producir una materia prima ideal para cultivos energéticos debido a las siguientes

características: altos rendimientos, que se pueden obtener en turnos cortos (3-5 años), elevada capacidad de rebrote, facilidad para la hibridación, amplia base genética y contenidos de energía similares a los de otras frondosas (KLANJA et al., 2002). Además, también se usan para fitorremediación, en combinación o no con propósitos de producción de biomasa (HAMMER et al., 2003; VERVAEKE et al., 2003; BALL et al., 2005; DICKINSON & PULFORD, 2005).

Los sauces (*Salix* spp.) cultivados como SRF en Galicia tendrían las siguientes ventajas:

- Económicas: importante fuente de biomasa para la producción de bioenergía, biocombustibles y otros bio-productos innovadores de alto valor para las industrias químicas (como xilitol y taninos condensados a partir de biorrefinado mecánico y químico de su madera y de su corteza).
- Ambientales: mejora y conservación del suelo y del agua (regulación hídrica, filtro de efluentes, reciclado de nutrientes, etc.), lucha contra el cambio climático (secuestro de carbono y minimización de la dependencia energética del petróleo), disminución de incendios forestales (al tratarse de una especie de bajo carácter pirofítico), revalorización de una frondosa autóctona y hábitat para fauna (especialmente para aves).
- Sociales: todo lo anterior convierte a los sauces en una posible alternativa frente al abandono rural en Galicia, por aportar unos beneficios a nivel económico y ambiental que permitirían el aprovechamiento y puesta en valor de determinadas tierras agrarias y marginales (zonas encharcadas, con pendientes...).

Son varios los países que llevan bastantes años trabajando con especies y clones del género *Salix* en los sistemas SRF, que se han convertido en una importante fuente de valiosos recursos forestales. En países como Suecia, Finlandia, EE. UU., Reino Unido, Argentina, Dinamarca, Bélgica, República Checa, Italia, Irlanda, Estonia o Alemania ya se practica este tipo de silvicultura para producir energía con sauces (ver PÉREZ-LÓPEZ, 2019). No obstante, las investigaciones sobre *Salix* en España y para estas finalidades son muy escasas (CASTAÑO-DÍAZ et al., 2018) y los resultados no se han trasladado masivamente al campo comercial.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es elaborar tarifas simples de una y dos entradas y sistemas de ecuaciones compatibles para la estimación de la biomasa aérea seca de árbol individual para plantaciones de *Salix* spp., clon Terranova, en turnos de corta rotación y altas densidades con fines energéticos en Galicia (distinguiendo entre biomasa leñosa y corteza en el caso de los sistemas de ecuaciones). Se pretende con ello poner a disposición de los gestores unas primeras herramientas que permitan una precisa y sencilla estimación de la productividad y la valoración de tales plantaciones como una alternativa económicamente viable, a la vez que ambientalmente responsable y socialmente beneficiosa, para muchos terrenos de Galicia actualmente abandonados o infrutilizados.

3. Metodología

El dispositivo experimental de campo utilizado incluye tres parcelas con plantaciones de turno corto del clon Terranova de la especie *Salix* spp. Dos de las parcelas están situadas en el ayuntamiento de San Sadurniño (parcelas “Intasa” y “Depuradora”) y la tercera en el de Mesía (parcela “Mesía”), todas en la provincia de A Coruña (Pérez-López, 2019). Ambas localidades se caracterizan, según la clasificación fitoclimática de ALLUÉ (1990), por el clima VI(V)¹⁴, nemoral genuino, al presentar precipitaciones medias superiores a 900 mm·año⁻¹ y temperaturas medias en el mes más frío superiores a 4°C, y que corresponde a asociaciones potenciales de vegetación en las que destacan las formaciones de quejigares, melojares o rebollares, encinares alsinares, robledales pubescentes y pedunculados y hayedos.

La parcela de Mesía se encuentra al este del municipio coruñés del mismo nombre, dentro de la Parroquia de Cumbraos en la localidad de Fonte Fría (Figura 1). La zona de muestreo se divide en dos partes. La franja situada al oeste está sobre terreno inclinado, bien drenado, con efecto sombra de sauces del país (*Salix atrocinerea*) y ligero efecto sombra por plantación de *Eucalyptus nitens* al sureste. La franja localizada al este está sobre suelo llano, próxima al cauce del regato Fontefría, por lo que se encuentra en una zona con inundaciones recurrentes y largos períodos de anegamiento, con ligero efecto sombra por plantación de *E. nitens*.



Figura 1. Localización y plano de la parcela "Mesía", ayuntamiento de Mesía (A Coruña).

Las características de la plantación de la parcela de Mesía son las siguientes:

- Superficie: aprox. 1.000 m².
- Preparación del terreno: entre finales de invierno y principios de primavera, cuando el estado del terreno lo permitió, evitando momentos totalmente encharcados. La vegetación preexistente era herbácea y se efectuó un desbroce mecanizado sin utilizar herbicida. Tras el desbroce, se realizó un gradeo para una homogenización ligera del terreno. Posteriormente, para disponer de un suelo bien mullido y de fácil manejo, a la vez que se eliminaba la maleza en la línea de plantación, se utilizó una fresadora rotovator. En esta parcela fue necesaria la canalización del agua estancada hacia el regato lindante, mediante retroexcavadora.
- Fecha de plantación: abril de 2010.
- Especie: *Salix* spp. Clon: Terranova.
- Tratamiento del material de reproducción: el material clonal se compró en 2010 a la empresa Lantmännen Agroenergi, responsable del estudio y creación de clones de sauce en Suecia en las últimas décadas, mediante su entonces división Lantmännen Renewable Fuels Ltd (con sede en York, Inglaterra). Las estaquillas, sin embargo, procedieron del recepe de unos ensayos de la empresa en Portugal del clon Terranova, de la que estaba encargada la empresa Arsal Medioambiente.
- Plantación: manual, siguiendo las pautas recomendadas por la empresa, con estaquillas de 20 - 25 cm de longitud y 2 - 4 cm de diámetro. No fue necesario el almacenamiento en cámara frigorífica y fueron plantadas directamente. Las estaquillas fueron enterradas en el suelo, dejando 2 - 3 cm por encima del mismo. No se adicionaron fertilizantes.
- Densidad de plantación: 10.000 pies/ha
- Marco de plantación: doble fila pareada con espaciamiento entre plantas de 1 x 0,5 m y separación entre dobles filas de 1,5 m (Figura 2). Este marco se varió en algunas ocasiones para aprovechar mejor la superficie con forma irregular.

- Estado actual: tras el recepado se ha incrementado la densidad de brotes hasta 8 - 9 por cepa durante los primeros años, lo que también ha favorecido un buen estado sanitario de la masa. Esta parcela se considera un reservorio del material genético clonal plantado (para la obtención de estaquillas) y no se prevé realizar nuevos recepes, al menos próximamente.

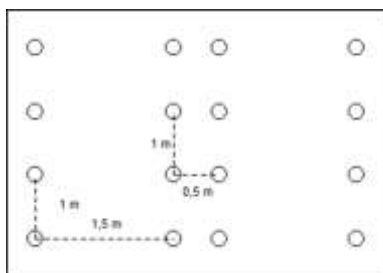
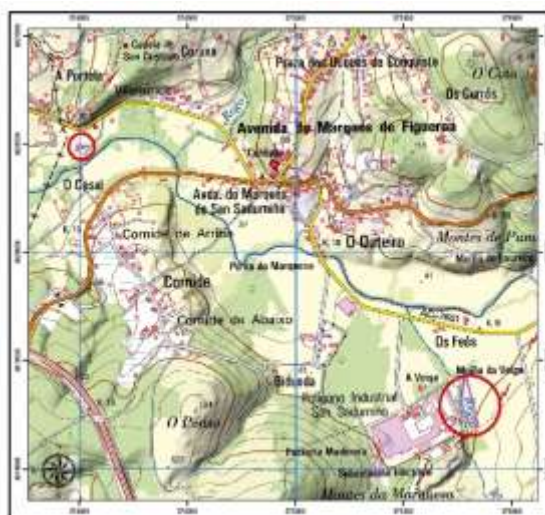


Figura 2. Esquema del marco de plantación de la parcela de Mesía.

La parcela “Intasa”, situada al lado de la factoría de dicha empresa en el municipio coruñés de San Sadurniño (Figura 3), está sobre suelo llano en su zona norte, pero bien drenado, sin encharcamiento, mientras que la zona sur está sobre terreno con pendiente suave $< 5^\circ$ y también bien drenado. En la franja oeste se encuentran frondosas autóctonas (*Quercus robur*, *Castanea sativa*, *Salix atrocinerea*, *Arbutus unedo*...) con efecto de sombra sobre las dos hileras más cercanas. La zona este de la parcela limita con terreno agrícola, con distintos cultivos en función de la época del año.

La parcela “Depuradora” se localiza junto a esa instalación en el municipio de San Sadurniño (Figura 3), está sobre suelo llano y tiene excelentes condiciones de luminosidad, ya que el uso de las parcelas colindantes es pastizal. En la franja sur de la parcela se encuentra una masa boscosa de *Salix atrocinerea*, pero el distanciamiento con la parcela es suficiente para evitar el efecto de sombra. Se encuentra en zona frecuentemente encharcada, por lo que no tiene problemas de déficit hídrico.



(a)



Figura 3. Localización (a) y plano de las parcelas "Intasa" (b) y "Depuradora" (c), ayuntamiento de San Sadurniño (A Coruña)

Las características de las plantaciones de las dos parcelas de San Sadurniño son las siguientes:

- Superficie: parcela "Intasa" de unos 8.500 m²; parcela "Depuradora" de unos 500 m².
- Preparación del terreno: igual que en la parcela "Mesía", aunque en estas dos parcelas se colocó una malla antihierbas Horsol, para proteger y fortalecer el adecuado crecimiento y desarrollo de las estaquillas frente a la competencia de herbáceas emergentes (principal motivo de marras en la parcela "Mesía").
- Fecha de plantación: abril de 2016.
- Especie: *Salix* spp. Clon: Terranova.
- Tratamiento del material de reproducción: se aprovechó el corte parcial de la parcela "Mesía" para obtener estaquillas, que se plantaron posteriormente en las dos parcelas de San Sadurniño. La plantación se realizó de la misma manera descrita para la parcela "Mesía".
- Densidad de plantación: 7.353 pies/ha
- Marco de plantación: triple fila pareada con espaciamiento entre plantas de 0,8 x 0,8 m y separación entre triples filas de 3,5 m (Figura 4).
- Estado actual: no se han recepado nunca estas parcelas. No se receparon después del primer o segundo año de crecimiento, como habría sido conveniente, lo que se debió a problemas con la empresa encargada de hacer dichos trabajos, que los retrasó en fecha hasta el límite en que no fue conveniente hacerlos por encontrarse los sauces ya brotados. Por esta razón, las parcelas presentan densidades de multiplicación mucho menores de lo esperado, de 2 - 3 brotes de media por cepa, y también un deficiente estado sanitario, seguramente acrecentado por el menor vigor de los brotes. Durante el seguimiento del cultivo se han encontrado ejemplares de las siguientes plagas: *Saperda populnea* y *Lachnus roboris*. En la parcela "Intasa", la fila exterior (la más alejada de la factoría y más expuesta) presenta signos de haber sido ramoneados los brotes por corzos (*Capreolus capreolus*).

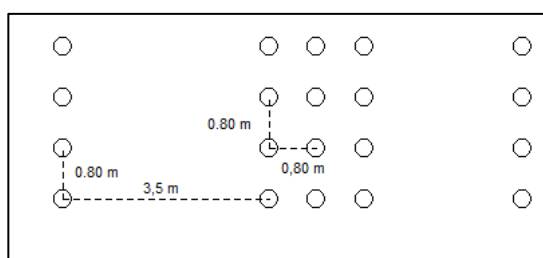


Figura 4. Esquema del marco de plantación de las parcelas de San Sadurniño.

Las tres parcelas fueron objeto de un inventario dasométrico y uno destructivo para la determinación de pesos (biomasa) en diferentes cepas, tanto en verde como en seco. En total (Mesía + San Sadurniño) se contó con la información de 95 cepas y 362 brotes, de los cuales 206 se utilizaron como submuestra de biomasa (Tablas 1 y 2).

En los inventarios de la parcela "Intasa" las muestras se recogieron de las distintas filas y de forma aleatoria, para incluir las variaciones existentes debido a la calidad del terreno, evitando las dos filas más próximas a la fábrica al estar muy afectadas por el efecto sombra de otra vegetación existente y la fila más exterior por los daños por ramoneo de corzo. En la parcela "Depuradora" las condiciones del terreno son muy similares, debido a su menor tamaño, pero también se muestreó en las diferentes filas. Cabe destacar que, al no haber sido recepados, las dimensiones de los árboles (o brotes) en las dos parcelas de San Sadurniño permitieron realizar un muestreo destructivo completo de los mismos (a diferencia de lo ocurrido en Mesía), sin necesidad de tomar una muestra y estimar a partir de la misma, por lo que se pudo obtener un valor real (no estimado) del peso seco (o biomasa total) de cada árbol o brote.

El proceso de selección aleatorio de cepas a inventariar en las parcelas de San Sadurniño se realizó de la siguiente manera: cada día se hacía un muestreo de una de las filas para inventariar en todas ellas, a excepción de las filas de los extremos para evitar el efecto borde y los menores crecimientos por asombrado o por ramoneo en la parcela "Intasa". Como además se extrajeron estaquillas de algunas cepas de varias líneas de esta plantación, en este caso se seleccionó para el inventario la primera cepa del centro (las filas son triples en estas plantaciones) a partir de la zona en la que no se había cortado ningún brote. A continuación, las siguientes se eligieron contando tres filas de tres cepas a partir de la inicial y se seleccionaba una de esas tres cepas siguiendo el sentido de las agujas del reloj (centro, derecha e izquierda), según se avanzaba por las líneas triples.

El proceso de obtención de datos en cada cepa siguió el protocolo detallado por la FORESTRY COMMISSION (2003) para sauces en rotaciones cortas. En cada cepa de San Sadurniño se midió el número de brotes, su diámetro basal con corteza a 0,25 m del suelo para evitar los engrosamientos en la base (d_{bc} , en cm, con calibre y con precisión 0,001 m, dos mediciones en cruz) y su altura total (h_c , en m, con pértiga telescópica y con precisión 0,05 m). En el caso de Mesía solamente se midieron los brotes. Posteriormente, en los brotes de las cepas seleccionadas (una muestra de los brotes de cada cepa en Mesía y todos los existentes en San Sadurniño) se midió su diámetro normal con corteza (d , en cm, a 1,3 m del suelo, con calibre y con precisión de 0,001 m, dos mediciones en cruz), su diámetro basal con corteza (d_b , en cm, con calibre y con precisión de 0,001 m, dos mediciones en cruz) y su longitud total (h , en m, con cinta métrica después de cortarlos y con precisión de 0,001 m).

A continuación, se procedió a realizar el muestreo destructivo de la biomasa (parcial en Mesía y completo de la cepa en San Sadurniño, como se ha indicado anteriormente). Cortados los brotes correspondientes a cada cepa, y la propia cepa a ras de suelo, fueron pesados (Mesía) o introducidos en bolsas numeradas y cerradas y trasladados a laboratorio (San Sadurniño), donde fue determinado su peso verde mediante pesado con precisión 0,005 kg. Los posibles brotes muertos fueron anotados, pero no se pesaron, se consideran despreciables al comparar su número, tamaño y peso con los brotes vivos. La determinación para las muestras de las parcelas de San Sadurniño del peso verde en laboratorio y no en campo, recién cortados los brotes y la cepa, se debió a la dificultad de calibrar adecuadamente en el terreno la balanza de precisión necesaria para poder medir de forma precisa los pequeños pesos de los brotes, debido a que no fueron recepadas nunca esas cepas. Se trató de evitar en lo posible la pérdida de humedad introduciendo rápidamente las muestras en bolsas de plástico cerradas y realizando las mediciones de peso verde en laboratorio el mismo día, lo antes posible.

Dado que del extracto de corteza de sauce se pueden obtener productos alternativos a los energéticos que resultan de interés y suponen un valor añadido para esta especie, una vez pesadas en verde las muestras se procedió a separar la corteza de la madera con un cúter para calcular el porcentaje de corteza de cada brote. El proceso de separación de corteza no se hizo de todo el brote, sino que de cada uno de ellos se cortaron tres muestras (de la parte baja, media y alta) de unos 10 - 15 cm y del total de las tres partes se calculó el porcentaje de peso verde de corteza de la muestra. Finalmente se secaron las muestras en estufas de aire a $105 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante, y se midió entonces su peso seco.

Las fechas de los inventarios realizados, junto al número de cepas y brotes inventariados con sus edades y tratamientos (edades de las cepas en los diferentes recepes), se muestran en la Tabla 1 para la parcela "Mesía" y en la Tabla 2 para las parcelas de San Sadurniño.

Tabla 1. Resumen de las cepas y brotes inventariados y de la muestra para obtención de biomasa en Mesía.

Fecha	Número de cepas inventariadas	Número de brotes inventariados	Número de brotes de la submuestra de biomasa	Edad de la cepa	Edad del brote	Tratamientos
Marzo 2015	10	88	21	5	2	1+2+2
Octubre 2015	6	27	18	6	3	1+2+3
Octubre 2015	7	60	12	6	1	1+2+2+1
Total	23	175	51	-	-	-

Nota: la nomenclatura de los tratamientos corresponde a las edades de las cepas en el momento de los distintos recepes

Tabla 2. Resumen de las cepas y brotes inventariados y de la muestra para obtención de biomasa en San Sadurniño.

Fecha/Parcela	Número de cepas inventariadas	Número de brotes inventariados	Número de brotes de la submuestra de biomasa	Edad de la cepa	Edad del brote	Tratamientos
Abril 2018 (Intasa)	18	52	38	2	2	2+0
Octubre 2018 (Intasa)	14	43	28	3	3	3+0
Febrero 2019 (Intasa)	17	36	36	3	3	3+0
Febrero 2019 (Depuradora)	12	30	30	3	3	3+0
Noviembre 2019 (Intasa)	8	16	14	4	4	4+0
Noviembre 2019 (Depuradora)	3	10	9	4	4	4+0
Total	72	187	155	-	-	-

Nota: la nomenclatura de los tratamientos corresponde a las edades de las cepas en el momento de los distintos recepes

En las Tablas 3 y 4 se muestran los estadísticos descriptivos de la muestra de brotes de inventario y de la submuestra para biomasa de Mesía y San Sadurniño respectivamente, y en la Tabla 5 los de la muestra de cepas inventariadas en San Sadurniño.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la muestra de brotes de inventario y de la submuestra para biomasa de Mesía.

Muestra	Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Inventario	d (cm)	1,32	3,2	0,00	0,76
	d _b (cm)	1,79	4,59	0,35	0,88
	h (m)	4,00	7,65	1,06	1,74
Biomasa	d (cm)	1,65	3,10	0,40	0,79
	d _b (cm)	2,13	4,59	0,65	0,96
	h (m)	4,75	7,62	1,77	1,72
	p _v (g)	810,35	2.973,20	33,99	790,58
	w _t (g)	400,98	1.552,00	15,80	409,47

d: diámetro normal del brote (cm); d_b: diámetro de la base del brote (cm); h: longitud del brote (m); p_v: peso verde del brote (g); w_t: peso seco o biomasa total del brote (g).

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la muestra de brotes de inventario y de la submuestra para biomasa de San Sadurniño.

Muestra	Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Inventario	d (cm)	1,62	4,11	0	0,99
	d _b (cm)	2,56	6,05	0,27	1,26
	h (m)	3,87	8,10	0,40	1,87
Biomasa	d (cm)	1,87	4,11	0,27	0,83
	d _b (cm)	2,91	6,05	0,65	1,07
	h (m)	4,46	8,10	1,41	1,42
	p _v (g)	1.293,20	6.735,89	41,97	1285,01
	w _t (g)	634,76	3.328,85	22,40	627,04

d: diámetro normal del brote (cm); d_b: diámetro de la base del brote (cm); h: longitud del brote (m); p_v: peso verde del brote (g); w_t: peso seco o biomasa total del brote (g).

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la muestra de cepas de San Sadurniño.

Muestra	Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Inventario	d _{bc} (cm)	4,62	8,67	2,05	1,48
	h _c (m)	4,84	8,14	2,08	1,46

d_{bc}: diámetro de la base de la cepa (cm); h_c: altura total de la cepa (m)

Con toda la información disponible se procedió a analizar la relación entre las distintas variables para todos los brotes de la submuestra para biomasa de las parcelas de ensayo, para comprobar las distintas tendencias, como por ejemplo se muestra en las siguientes Figuras 5 y 6. Este análisis se realizó exclusivamente para las variables de los brotes, pues no se contó con información de todas las variables de las cepas de Mesía.

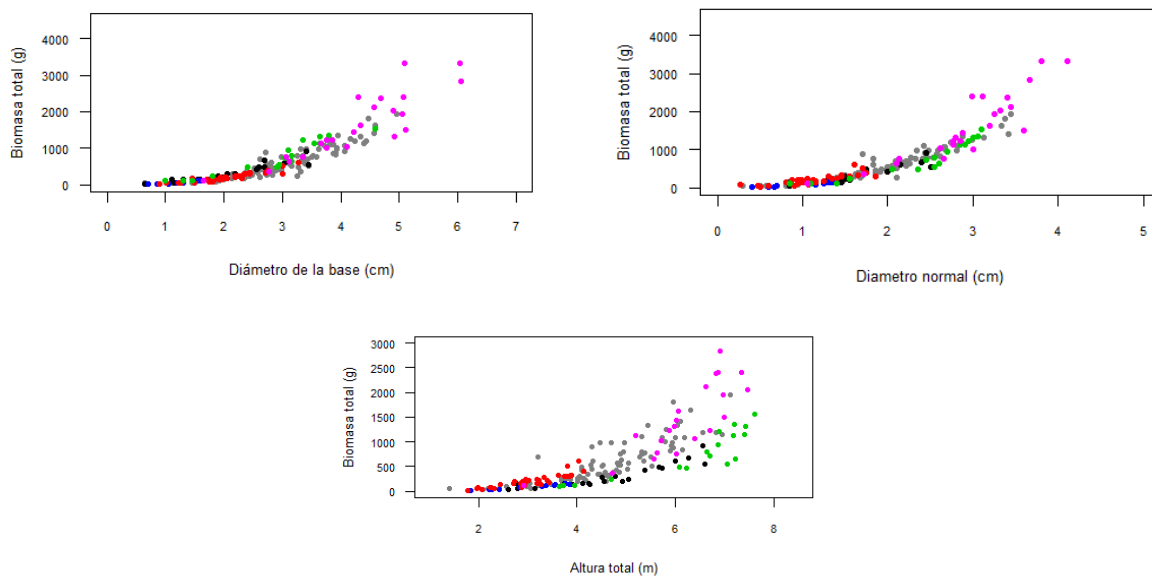


Figura 5. Relación entre la biomasa total (w_t) frente al diámetro de la base (d_b), el diámetro normal (d) y la longitud del brote (h) para todos los brotes de la submuestra para biomasa de las parcelas de ensayo. Azul: brotes 1+2+2+1 de Mesía; Negro: brotes 1+2+2 de Mesía; Verde: brotes 1+2+3 de Mesía; Rojo: brotes 2+0 de San Sadurni; Gris: brotes 3+0 de San Sadurni; Rosa: brotes 4+0 de San Sadurni.

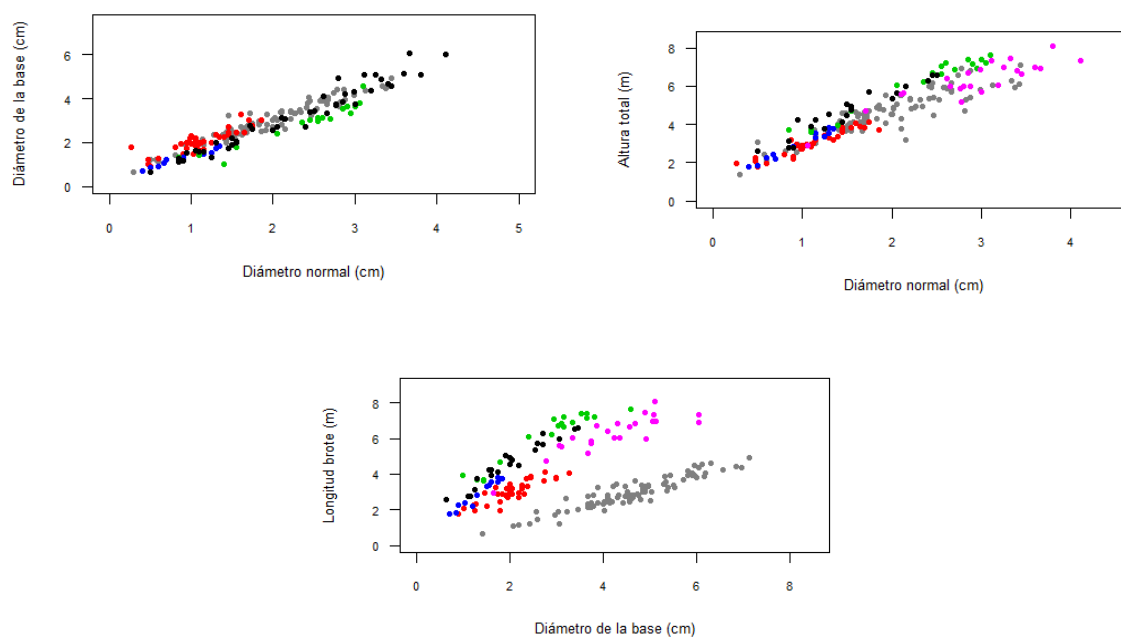


Figura 6. Relaciones entre el diámetro de la base (d_b), el diámetro normal (d) y la longitud del brote (h) para todos los brotes de la submuestra para biomasa de las parcelas de ensayo. Azul: brotes 1+2+2+1 de Mesía; Negro: brotes 1+2+2 de Mesía; Verde: brotes 1+2+3 de Mesía; Rojo: brotes 2+0 de San Sadurni; Gris: brotes 3+0 de San Sadurni; Rosa: brotes 4+0 de San Sadurni.

A partir de toda la información anterior se elaboraron dos grupos de ecuaciones para la predicción de la biomasa: tarifas simples de biomasa seca total de los brotes, de una y dos entradas (de forma independiente y conjunta con los datos de Mesía y San Sadurniño), y sistemas de ecuaciones compatibles para la predicción de la biomasa seca total, de madera y de corteza de los brotes (de forma independiente para las parcelas de cada ayuntamiento).

Para elaborar las tarifas simples se seleccionó el modelo alométrico como el mejor para representar las tendencias matemáticas que muestran las relaciones entre la biomasa y el resto de las variables de los brotes analizadas. Diferentes estudios (p.ej. CHAVE et al., 2004; LITTON & KAUFFMAN, 2008; RIOFRÍO et al., 2013) consideran que las ecuaciones alométricas pueden proporcionar una estimación acertada de la biomasa, y estos modelos han sido utilizados en trabajos similares en Galicia para otras especies (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2009). Normalmente la variable que mejor explica la biomasa de un árbol es el diámetro normal, siendo la más sencilla y, por tanto, la más comúnmente usada para la alometría (TER-MIKAELIAN & KORZUKHIN, 1997; GOWER et al. 1999; ACOSTA et al., 2002; NÁVAR, 2009). En otras ocasiones, para mejorar la capacidad de predicción de la biomasa se propone incluir una segunda variable (RIOFRÍO et al., 2013), que en este caso fue una combinación de dos de las tres variables analizadas: diámetro normal, diámetro basal y longitud de los brotes.

El ajuste de modelos alométricos, no lineales, se realizó por un procedimiento iterativo para determinar estadísticamente los parámetros. Para ello fue necesario sugerir valores a cada parámetro, que se obtuvieron mediante el ajuste de una versión linealizada por transformación logarítmica (KLEINBAUM et al., 1988). Para comparar adecuadamente los modelos ajustados se tuvieron en cuenta los valores de los siguientes estadísticos de bondad del ajuste: el coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error medio cuadrático REMC (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2009). Además, para una correcta selección de los modelos únicamente se deben considerar aquellos que presenten todos sus parámetros significativos ($\alpha = 0,05$), descartando los que no cumplan con esta condición.

Por otra parte, también se ajustaron sistemas de ecuaciones compatibles para la predicción de la biomasa seca total, de madera y de corteza de los brotes, que permiten estimar simultáneamente la biomasa de las tres fracciones, garantizando así su aditividad, es decir, que las estimaciones del modelo total sean iguales a la suma de las estimaciones de las tres fracciones por separado.

Para ello se eligió un enfoque desagregativo basado en la adaptación de un modelo para la biomasa total (w_t , en g), en este caso un modelo alométrico utilizando como variables independientes el diámetro normal (d , en cm) y la longitud del brote (h , en m):

$$w_t = a_0 \cdot d^{a1} \cdot h^{a2} \quad [\text{Ec. 1}]$$

y posteriormente se desagregó ese modelo utilizando una función para discriminar entre la biomasa de la madera (w_m , en g) y de la corteza (w_c , en g):

$$w_m/(w_m+w_c) = w_m/w_t = 1/(1 + c_0 \cdot d^{c1} \cdot h^{c2}) = A \quad [\text{Ec. 2}]$$

con lo que:

$$\begin{aligned} w_m &= w_t \cdot 1/(1 + c_0 \cdot d^{c1} \cdot h^{c2}) = w_t \cdot A \\ w_c &= w_t \cdot (1-1/(1 + c_0 \cdot d^{c1} \cdot h^{c2})) = w_t \cdot (1 - A) \\ w_t &= w_m + w_c \end{aligned}$$

El sistema quedó compuesto por las dos ecuaciones [Ecs. 1 y 2] que se ajustaron simultáneamente utilizando regresión aparentemente no relacionada para tener en cuenta la correlación de errores (ÁLVAREZ-GONZÁLEZ et al., 2007). También se probó considerando como variables independientes los diámetros normal (d , en cm) y de la base (d_b , en cm).

Todos los ajustes (tarifas simples y sistemas de ecuaciones) se realizaron utilizando el programa R versión 3.6.0 (R CORE TEAM, 2019).

4. Resultados

Los resultados de los ajustes de las tarifas simples de biomasa seca total de los brotes, de una y dos entradas, se muestran en las Tablas 6 (Mesía), 7 (San Sadurniño) y 8 (para ambas localidades).

Tabla 6. Ecuaciones para predicción de biomasa y estadísticos descriptivos de bondad de ajuste para la parcela de Mesía (*: ecuaciones en las que todos los parámetros son significativos $\alpha=0,05$).

Ecuación	Variables	Modelo	R ²	REMC (g)	Nivel de significación
3*	d, d_b	$w_t = 60,49 \cdot d^{1,803} \cdot d_b^{0,788}$	0,964	79,67	$3,04 \cdot 10^{-10}$; $5,3 \cdot 10^{-9}$; 0,00103
4	d, h	$w_t = 150,13 \cdot d^{3,018} \cdot h^{-0,596}$	0,956	87,74	0,185; $1,11 \cdot 10^{-9}$; 0,305
5	d_b, h	$w_t = 8,77 \cdot d_b^{1,429} \cdot h^{1,510}$	0,942	100,83	0,0829; $1,18 \cdot 10^{-6}$; 0,000899
6*	d	$w_t = 70,41 \cdot d^{2,622}$	0,955	87,84	$9,09 \cdot 10^{-10}$; $2 \cdot 10^{-16}$
7*	d_b	$w_t = 56,44 \cdot d_b^{2,269}$	0,925	113,55	$4,71 \cdot 10^{-8}$; $2 \cdot 10^{-16}$
8	h	$w_t = 0,88 \cdot h^{3,600}$	0,902	129,52	0,0789; $2 \cdot 10^{-16}$

w_t : biomasa seca total aérea del brote (g); d : diámetro normal (a 1,30 m del suelo) del brote (cm); h : longitud del brote (m); d_b : diámetro en la base del brote (cm).

Tabla 7. Ecuaciones para predicción de biomasa y estadísticos descriptivos de bondad de ajuste para las parcelas de San Sadurniño (*: ecuaciones en las que todos los parámetros son significativos $\alpha=0,05$; en este caso todas).

Ecuación	Variables	Modelo	R ²	REMC (g)	Nivel de significación
9*	d, d_b	$w_t = 58,47 \cdot d^{1,406} \cdot d_b^{1,379}$	0,936	160,17	$2,97 \cdot 10^{-14}$; $2,62 \cdot 10^{-13}$; $7,79 \cdot 10^{-9}$
10*	d, h	$w_t = 38,14 \cdot d^{1,859} \cdot h^{0,876}$	0,932	164,94	$6,97 \cdot 10^{-6}$; $2 \cdot 10^{-16}$; $1,62 \cdot 10^{-6}$
11*	d_b, h	$w_t = 13,83 \cdot d_b^{1,884} \cdot h^{1,017}$	0,921	177,69	$1,19 \cdot 10^{-6}$; $2 \cdot 10^{-16}$; $4,61 \cdot 10^{-7}$
12*	d	$w_t = 102,72 \cdot d^{2,416}$	0,920	177,46	$2 \cdot 10^{-16}$; $2 \cdot 10^{-16}$
13*	d_b	$w_t = 32,41 \cdot d_b^{2,564}$	0,906	192,81	$2,95 \cdot 10^{-15}$; $2 \cdot 10^{-16}$
14*	h	$w_t = 4,01 \cdot h^{3,174}$	0,845	247,97	0,000104; $2 \cdot 10^{-16}$

Tabla 8. Ecuaciones para predicción de biomasa y estadísticos descriptivos de bondad de ajuste para el conjunto de parcelas (Mesía + San Sadurniño) (*: ecuaciones en las que todos los parámetros son significativos $\alpha=0,05$; en este caso todas).

Ecuación	Variabes	Modelo	R ²	REMC (g)	Nivel de significación
15*	d, d _b	$w_t = 57,98 \cdot d^{1,551} \cdot d_b^{1,042}$	0,934	155,26	$2 \cdot 10^{-16}$; $2 \cdot 10^{-16}$; $4,18 \cdot 10^{-12}$
16*	d, h	$w_t = 60,27 \cdot d^{2,399} \cdot h^{0,290}$	0,918	172,95	$6,26 \cdot 10^{-7}$; $2 \cdot 10^{-16}$; 0,0465
17*	d _b , h	$w_t = 12,65 \cdot d_b^{1,925} \cdot h^{1,034}$	0,918	172,55	$2,15 \cdot 10^{-8}$; $2 \cdot 10^{-16}$; $1,75 \cdot 10^{-13}$
18*	d	$w_t = 86,66 \cdot d^{2,558}$	0,916	174,29	$2 \cdot 10^{-16}$; $2 \cdot 10^{-16}$
19*	d _b	$w_t = 36,28 \cdot d_b^{2,506}$	0,894	196,05	$2 \cdot 10^{-16}$; $2 \cdot 10^{-16}$
20*	h	$w_t = 4,93 \cdot h^{2,962}$	0,714	322,16	0,00208; $2 \cdot 10^{-16}$

En los tres casos (datos independientes de Mesía, de San Sadurniño o conjuntos de ambos ayuntamientos) el mejor modelo (mayor R² y menor REMC) resultó siempre el de dos variables que incluye al diámetro normal (d) y al diámetro en la base (d_b). Así, las mejores ecuaciones fueron la [Ec. 3] (Mesía), [Ec. 9] (San Sadurniño) y [Ec. 15] (Mesía + San Sadurniño).

Para comprobar los ajustes de esos mejores modelos de cada zona, se muestran en las Figuras 7 y 8 los valores observados frente a los predichos y los residuos de la estimación de los modelos frente a los valores estimados.

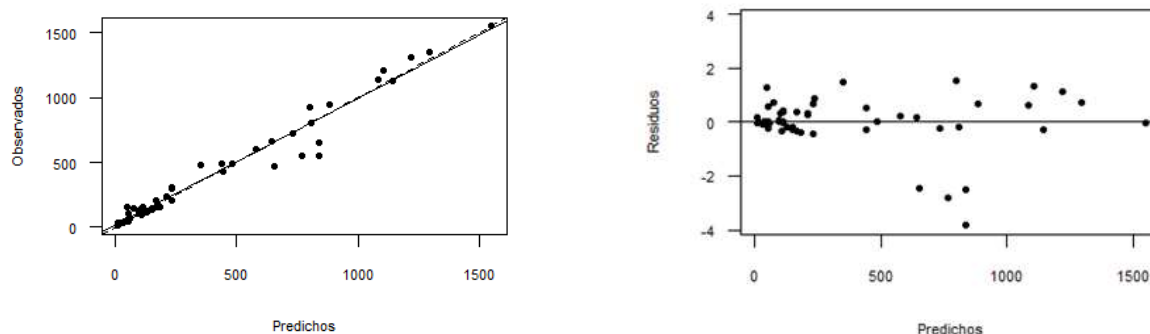


Figura 7. Gráficos de los valores observados frente a los valores predichos o estimados (izq.) y de los residuos de la estimación del modelo frente a los valores predichos o estimados (dcha.) de la biomasa seca total del mejor modelo ajustado para el municipio de Mesía.

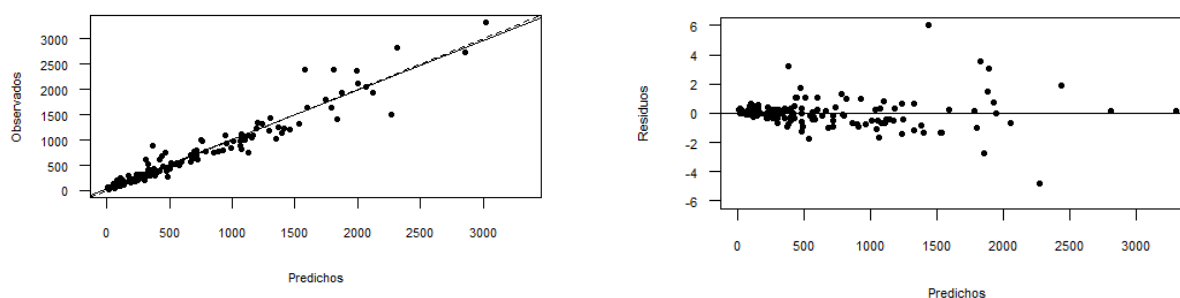


Figura 8. Gráficos de los valores observados frente a los valores predichos o estimados (izq.) y de los residuos de la estimación del modelo frente a los valores predichos o estimados (dcha.) de la biomasa seca total del mejor modelo ajustado para el municipio de San Sadurniño.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los sistemas de ecuaciones compatibles para la predicción de la biomasa seca total, de madera y de corteza de los brotes.

Los resultados para Mesía fueron:

[Ec. 21]	$w_t = 4,2727 \cdot d^{2,6160} \cdot h^{-0,0072}$ $A = 1/(1 + (-1,0958 \cdot d^{-0,8213} \cdot h^{-0,0071}))$	$R^2 = 0,956$
[Ec. 22]	$w_m = w_t \cdot A = w_t \cdot 1/(1 + (-1,0958 \cdot d^{-0,8213} \cdot h^{-0,0071}))$	$R^2 = 0,958$
[Ec. 23]	$w_c = w_t \cdot (1 - A) = w_t \cdot (1 - 1/(1 + (-1,0958 \cdot d^{-0,8213} \cdot h^{-0,0071})))$	$R^2 = 0,914$
[Ec. 24]	$w_t = 4,2252 \cdot d^{2,4675} \cdot d_b^{0,1493}$ $A = 1/(1 + (-1,0732 \cdot d^{-0,7427} \cdot d_b^{-0,0985}))$	$R^2 = 0,960$
[Ec. 25]	$w_m = w_t \cdot A = w_t \cdot 1/(1 + (-1,0732 \cdot d^{-0,7427} \cdot d_b^{-0,0985}))$	$R^2 = 0,961$
[Ec. 26]	$w_c = w_t \cdot (1 - A) = w_t \cdot (1 - 1/(1 + (-1,0732 \cdot d^{-0,7427} \cdot d_b^{-0,0985})))$	$R^2 = 0,915$

Y los de San Sadurniño:

[Ec. 27]	$w_t = 4,2502 \cdot d^{2,2872} \cdot h^{0,2936}$ $A = 1/(1 + (-1,0719 \cdot d^{-0,4568} \cdot h^{-0,1223}))$	$R^2 = 0,924$
[Ec. 28]	$w_m = w_t \cdot A = w_t \cdot 1/(1 + (-1,0719 \cdot d^{-0,4568} \cdot h^{-0,1223}))$	$R^2 = 0,928$
[Ec. 29]	$w_c = w_t \cdot (1 - A) = w_t \cdot (1 - 1/((-1,0719 \cdot d^{-0,4568} \cdot h^{-0,1223})))$	$R^2 = 0,855$
[Ec. 30]	$w_t = 4,4305 \cdot d^{2,1953} \cdot d_b^{0,3138}$ $A = 1/(1 + (-1,1653 \cdot d^{-0,4802} \cdot d_b^{-0,0725}))$	$R^2 = 0,926$
[Ec. 31]	$w_m = w_t \cdot A = w_t \cdot 1/(1 + (-1,1653 \cdot d^{-0,4802} \cdot d_b^{-0,0725}))$	$R^2 = 0,930$
[Ec. 32]	$w_c = w_t \cdot (1 - A) = w_t \cdot (1 - 1/(1 + (-1,1653 \cdot d^{-0,4802} \cdot d_b^{-0,0725})))$	$R^2 = 0,860$

siendo:

- w_t : biomasa seca total aérea del brote (g)
- w_m : biomasa seca de madera del brote (g)
- w_c : biomasa seca de la corteza del brote (g)
- d : diámetro normal (a 1,30 m del suelo) del brote (cm)
- h : longitud del brote (m)
- d_b : diámetro en la base del brote (cm)

5. Discusión

Los resultados obtenidos con las tarifas simples difieren en parte de los obtenidos en otros trabajos similares, que presentan como mejor combinación de dos variables el diámetro normal y la altura total (KETTERINGS et al., 2001; BRANDEIS et al., 2006; SIXTO et al., 2007; SAMPAIO et al., 2010; RIOFRÍO et al., 2013), frente a este estudio en el que se ha encontrado la mejor correlación entre variables diamétricas [Ecs. 3, 9 y 15]. Esas ecuaciones son las que se deberían aplicar para obtener las mejores estimaciones minimizando los errores, pero tienen el inconveniente de que la medición del diámetro en la base (d_b) es más compleja y muchas veces no suele estar disponible, por lo que una alternativa puede ser utilizar las ecuaciones de dos entradas que incluyen el diámetro normal (d) y la longitud del brote (h), que fueron las siguientes con mejores valores de los estadísticos del ajuste [Ecs. 4, 10 y 16]; o bien, cuando sea preciso, utilizar las ecuaciones de una sola entrada

que incluyen el diámetro normal (d) como variable independiente [Ecs. 6, 12 y 18], aunque en estos casos habrá que considerar los mayores errores de estimación.

En un estudio reciente (PÉREZ-LÓPEZ, 2019), utilizando las mejores ecuaciones de dos entradas para cada ayuntamiento, se realizó una estimación de la productividad anual por hectárea que podrían alcanzar estas plantaciones (considerando los mismos marcos, densidades de plantación y tratamientos estudiados). Los resultados mostraron valores dentro de los rangos habituales establecidos en la literatura científica en el caso de Mesía (7.725 – 11.247 kg · ha⁻¹ · año⁻¹), pero bastante por debajo de los mismos para San Sadurniño (2.817 - 4.226 kg · ha⁻¹ · año⁻¹), seguramente debido a la ausencia de recepes. La conclusión fue que las plantaciones de turno corto de sauces, con un correcto tratamiento, pueden ser una interesante alternativa económica para Galicia, con importantes valores ambientales y sociales añadidos.

Al igual de lo sucedido con las tarifas simples, los sistemas de ecuaciones que dieron lugar a mejores ajustes en los dos casos (datos independientes de Mesía y de San Sadurniño) resultaron los que incluyeron como variables independientes el diámetro normal (d) y el diámetro en la base (d_b). Esas ecuaciones [Ecs. 24, 25, 26, 30, 31 y 32] son las que se deberían aplicar para obtener las mejores estimaciones minimizando los errores, pero también tienen el inconveniente de que la medición del diámetro en la base (d_b) es más compleja y muchas veces no suele estar disponible, por lo que la alternativa sería utilizar las ecuaciones que incluyen el diámetro normal (d) y la longitud del brote (h) [Ecs. 21, 22, 23, 27, 28 y 29], que tienen unos valores de R² algo menores que las anteriores, por lo que los errores al utilizarlas serán algo mayores.

6. Conclusiones

Se han elaborado unas primeras tarifas simples de una y dos entradas y sistemas de ecuaciones compatibles para la estimación de la biomasa aérea seca de árbol individual para plantaciones de *Salix* spp., clon Terranova, en turnos de corta rotación y altas densidades con fines energéticos en Galicia, obteniéndose siempre los mejores resultados al utilizar como variables independientes el diámetro normal y el diámetro en la base.

Los resultados de este trabajo deben considerarse muy parciales y aplicarse con mucha precaución, debido a que los datos se tomaron en dos localidades y en pocas parcelas de experimentación, a que los tratamientos no fueron los óptimos en algunos casos (densidades menores de las habituales, falta de recepes) y a que además no fue posible inventariar suficientes combinaciones de tratamientos o crecimientos, ni largos periodos de rotación.

Por tanto, resulta conveniente continuar el seguimiento de las parcelas utilizadas, y realizar nuevas plantaciones con la especie, en las que resultaría fundamental aplicar los recepes a las edades recomendadas. Además, también sería necesario probar distintas densidades de plantación y espaciamientos, la utilización de mallas antihierbas para disminuir la competencia herbácea, aplicaciones de fertilizantes (ecológicos a ser posible) y los efectos del riego en época estival.

7. Agradecimientos

Los trabajos realizados en este artículo fueron financiados por los proyectos “*Salgueiralnovo: Reenxeñería do seu proceso produtivo y Greening da PAC*” (FEADER 2015/39) y “*Bioeconomía do Salix*” (FEADER 2017/019A), liderados por la empresa INTASA (Industrias del Tablero, S.A.) y con la participación de la *Unidade de Xestión Ambiental y Forestal Sostible* (UXAFORES), de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería del Campus Terra de Lugo (Universidad de Santiago de Compostela). Los autores quieren agradecer especialmente la colaboración y facilidades prestadas por parte de Javier Viña y Celso Marra (INTASA).

8. Bibliografía

ACOSTA, M.M.; VARGAS H.J.; VELÁSQUEZ M.A.; ETCHEVERS B.J.D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725–736.

ALLUÉ, J.L. 1990. Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. 221 pp. Madrid.

ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; ROJO, A. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 35-42.

BALL, J.; CARLE, J.; DEL LUNGO, A. 2005. Contribution of poplars and willows to sustainable forestry and rural development. *Unasylva* 221(56): 3–9.

BRANDEIS, T.J.; DELANEY, M.; PARRESOL, B.R.; ROYER, L. 2006. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *Forest Ecology and Management* 233: 133–142.

BROECKX, L.S.; VERLINDEN, M.S.; CEULEMANS, R. 2012. Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): Effects of genotype and former land use. *Biomass and Bioenergy* 42: 151–163.

CASTAÑO-DÍAZ, M.; BARRIO-ANTA, M.; AFIF KHOURI, E.; CÁMARA-OBREGÓN, A. 2018. Willow Short Rotation Coppice Trial in a Former Mining Area in Northern Spain: Effects of Clone, Fertilization and Planting Density on Yield after Five Years. *Forests* 9(3), 154.

CHAVE, J.; CONDIT, R.; AGUILAR, S.; HERNANDEZ, A.; LAO, S.; PEREZ, R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B- Biological sciences* 359: 409–420.

CHRISTERSSON, L.; VERMA, K. 2006. Silvicultura de rotación corta: un complemento de la silvicultura “convencional”. *Unasylva* 223, 57: 34–39.

DICKINSON, N.M.; PULFORD, I.D. 2005. Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice *Salix*: the evidence trail. *Environment International* 31: 609–613.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO-ALBORECA, 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.Á.; GORGOSO VARELA, J.J.; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F.; GÓMEZ-GARCÍA, E. 2009. Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Xunta de Galicia. 259 pp.

- DURÁN, V.H.; RODRÍGUEZ, C.R.; FRANCIA, J.R.; SAYADI, S.; JIMÉNEZ, J.A.; PEREA, F. 2014. Biomass from short-rotation crops for sustainable energy production: opportunities and challenges. *Spanish Journal of Rural Development* 5(1): 21–46.
- FORESTRY COMMISSION. 2003. Mensurational variables protocol. En: Forestry Commission, Ae.: Yield Models for Energy Coppice of Poplar and Willow. 14 pp.
- GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, F(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing Environment* 70: 29–51.
- HAMMER, D.; KAYSER, A.; KELLER, C. 2003. Phytoextraction of Cd and Zn with *Salix viminalis* in field trials. *Soil Use Manage* 19: 187–192.
- HOOGWYJK, M.; FAAIJ, A.; EICKHOUT, B.; DE VRIES, B.; TURKENBURG, W. 2005. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29(4): 225–257.
- KETTERINGS, Q.M.; COE, R.; VAN NOORDWIJK, M.; AMBAGAU, Y.; PALM, C.A. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 199–209.
- KLASNJA, B.; KOPITOVIC, S.; ORLOVIC, S. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy* 23: 427–432.
- KLEINBAUM, D.G.; KUPPER, L.L.; MULLER, K.E. 1988. Applied regression analysis and other multivariable methods. PWS-Kent Publishing Co. 718 pp. Boston.
- LITTON, C.M.; KAUFFMAN, J.B. 2008. Allometric models for predicting above-ground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica* 40: 313–320.
- LUND, P.; BYRNE, J.; BERNDES, G.; VASALOS, I. 2016. Advances in Bioenergy. Wiley, UK, 982 pp.
- NAVAR, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427–434.
- PÉREZ-LÓPEZ, C. 2019. Productividad de plantaciones de turno corto de *Salix* spp. en Galicia. Trabajo Fin de Máster. Universidade de Santiago de Compostela. 72 pp.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL. <https://www.r-project.org>.
- RIOFRÍO, J.; HERRERO DE AZA, C.; GRIJALVA, J.; BRAVO, F. 2013. Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la ecorregión andina del Ecuador. 6CFE01-023. 13 pp.

SAMPAIO, E.; GASSON, P.; BACARAT, A.; CUTLER, D.; PAREYN, F.; COSTA-LIMA, K. 2010. Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. *Forest Ecology and Management* 259: 1135–1140.

SIXTO, H.; HERNÁNDEZ, M.J.; BARRIO, M.; CARRASCO, J.; CAÑELLAS, I. 2007. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16(3): 277–294.

TER-MIKAELIAN, M.T.; KORZUKHIN, M.D. 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1–24.

VERVAEKE, P.; LUYSSAERT, S.; MERTENS, J.; MEERS, E.; TACK, F.M.G.; LUST, N. 2003. Phytoremediation prospects of willow stands on contaminated sediment: a field trial. *Environment Pollution* 126: 275–282.

ZURBA, K.; OERTEL, C.; MATSCHULLAT, J. 2013. CO₂ emissions from willow and poplar short rotation forestry (SRF) on a derelict mining soil. En: Šiška, B.; Nejedlík, P.; Hájková, L.; Kožnarová, V. (eds.). International Scientific Conference - Environmental changes and Adaptation Strategies, 9-11 septiembre-2013; Skalica, Slovakia.