

MEJORA DE LA CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR FORESTAL A LA LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

HERRAMIENTAS PARA LA ESTIMACIÓN *EX ANTE* DE
BIOMASA FIJADA POR REPOBLACIONES, EN FUNCIÓN DE
LA EDAD, UBICACIÓN Y DENSIDAD, PARA LAS
PRINCIPALES ESPECIES Y GRUPOS DE ESPECIES
FORESTALES

DICIEMBRE DE 2025



El proyecto eco2for cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Este material ha sido desarrollado por:



ICIFOR–INIA, CSIC

En colaboración con:

- Subdirección General Política Forestal y Lucha contra la Desertificación: Guillermo Fernández, María Pasalodos, Elena Robla.
- Junta de Andalucía: Jose Ramón Guzmán.
- Diputación General de Aragón: Enrique Arrechea, Álvaro Hernández, Ignacio Pérez–Soba.
- Principado de Asturias: Juan Manuel Garrote.
- Junta de Castilla y León: José Ceballos, Ángel Iglesias (S.T. Ávila); Alfredo Rodríguez–Garagorri, Ignacio Rojo, Froilán Sevilla (S.T. Burgos); Luis Carlos Jovellar (S.T. Salamanca); Carlos Domínguez (S.T. Soria); Alfonso González, Javier Gordo (S.T. Valladolid); David Villada (Dirección Gral. Patrimonio Natural y Política Forestal)
- SOMACYL: Ignacio Arroyo.
- CESEFOR: Roberto Rubio, Darío Arias.
- Junta Comunidades Castilla la Mancha: Susana Ayuso (S.T. Guadalajara), Pedro Díaz (S.T. Guadalajara).
- Junta de Extremadura: Javier Sanz Hermoso.
- CICYTEX: Elena Nieto, Paula Serrano.
- Comunidad de Madrid: Javier Cantero, Nieves Cañadas, José Cuesta, Miguel Ángel Martín; Santiago Asenjo.
- Comunidad de Murcia: Miguel Chamón, Esteban Jordán.
- Comunidad Foral de Navarra: Salomé Hernando, Cristóbal Molina.
- Comunidad de la Rioja: Julio de la Cruz.
- País Vasco: Alejandro Cantero (Fundación Hazi), Bixente Dorronsoro (Diputación. Guipúzcoa) Txema Omañas (Diputación Bizkaia), Aitor Onaindía (Basoa Fundazioa).
- Universidad de Córdoba: Rafael Navarro.
- Universidad de León: Fernando Castedo.
- Universidad de Oviedo: Pedro Álvarez.
- Universidad de Santiago de Compostela: Juan Gabriel Álvarez, Alberto Rojo, Ulises Diéguez, Roque Rodríguez–Soalleiro.
- ENCE: Federico Ruiz – Fernández.
- LIGNUM FORESTAL: David Barrero, Susana García, Guillermo Martínez.

Cómo citar:

Calama R., García M., González–Gaarslev D., López–Senespleda E., Madrigal G., Pardos M., del Río M., Núñez Manso, Y., Ramos, R., Ruiz–Peinado R., y Menéndez–Miguélez M. 2025. Herramientas para la estimación ex ante de biomasa fijada por repoblaciones, en función de la edad, ubicación y densidad, para las principales especies y grupos de especies forestales. Informe inédito. Versión 1. ICIFOR, INIA–CSIC. © 2025 by RAFAEL CALAMA SAINZ et al. is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ÍNDICE

1. Introducción y antecedentes.....	4
2. Objetivos.....	4
3. Datos de ajuste.....	6
3.1. Características de las bases de datos y mediciones realizadas	7
4. Estimación de variables de interés	8
5. Definición de la tipología de grupos de especies	12
6. Construcción de modelos	12
6.1. Modelo base	12
6.2. Expansión de los modelos mediante inclusión de la densidad y ubicación..	13
7. Resultados (I): modelos desarrollados para especies individuales	15
8. Resultados (II): modelos desarrollados para grupos de especies	43
9. Estimación de biomasa subterránea	50
10. Ejemplos de uso para la estimación <i>ex ante</i> de biomasa fijada por un proyecto de repoblación del que se conoce la localización exacta y la densidad de plantación.....	51
11. Recomendaciones de uso	53
12. Bibliografía.....	55
ANEXO (A1). Tabla de precipitación media provincial y asignación de las provincias a las grandes áreas territoriales	57
ANEXO (A2). Listado de abreviaturas y unidades	59

INFORMACIÓN DEL DOCUMENTO

PROYECTO BF138 – CONVOCATORIA BIOECONOMÍA FORESTAL 2023	
Título del proyecto	Mejora de la contribución del sector forestal a la lucha contra el cambio climático
Acrónimo del proyecto	eco2for
Título acción	A3 Mejora de las herramientas de cálculo de proyectos de forestación
Título subacción	A.3.1. Creación de nueva calculadora de cálculo de ámbito nacional para proyectos de forestación.
Duración	M2–M19
Código resultado	R 3.2
Nombre del entregable	Nueva calculadora para proyectos de forestación. Colección de modelos para la estimación <i>ex post</i> .
Entidad coordinadora de la acción	INIA
Entidad coordinadora de la subacción	INIA

1. Introducción y antecedentes

En el marco del Acuerdo por el Clima de París se firmó un compromiso para mantener el “incremento de la temperatura media global por debajo de + 2 °C respecto de los niveles pre-industriales”. La consecución de este objetivo requiere de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a las actividades industriales y al cambio de usos del suelo, y del aumento del potencial de los sumideros terrestres de carbono atmosférico (Griscom et al., 2017). Dada la capacidad de fijación de carbono atmosférico que los árboles y bosques poseen por medio de la fotosíntesis, el incremento de la superficie forestal mediante la repoblación de terrenos deforestados y/o degradados se considera una de las medidas más eficaces para contribuir al cumplimiento de los objetivos de neutralidad climática y mitigación del cambio climático (Chazdon y Brancalio, 2019). Un ejemplo de la importancia de la repoblación forestal en las políticas de mitigación del Cambio Climático es el caso del sector de usos de la tierra, cambios de uso y silvicultura (LULUCF), sector con absorciones netas de carbono (C) atmosférico, y en el que uno de los principales compartimentos a considerar como sumidero es el de las tierras forestadas (aumento de la superficie forestal debido a la acción humana) durante los primeros 20 años tras la plantación (Robla y González, 2018). A nivel nacional hay que destacar iniciativas como el *Registro de Huella de Carbono, compensación y proyectos de absorción de CO₂* del MITERD, que es un programa voluntario que permite a las empresas compensar su huella de carbono mediante la contabilización de C atmosférico fijado por los proyectos de repoblación (<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/registro-huella.html>).

Pese al importante papel que las repoblaciones forestales pueden jugar en la mitigación del cambio climático, existen numerosas incertidumbres acerca de la capacidad y potencial real de fijación de C por este tipo de nuevas formaciones. Una de las principales incertidumbres es que no se dispone de herramientas específicas para realizar una cuantificación precisa e insesgada de la biomasa contenida y la capacidad de fijación de C atmosférico por las repoblaciones forestales. Las ecuaciones de biomasa de árbol individual disponibles (p.ej. Ruiz-Peinado et al., 2011, 2012) se construyeron a partir de muestreos destructivos de arbolado adulto, con diámetro normal superiores a 7 cm, obtenido en masas naturales o repoblaciones antiguas naturalizadas, no teniendo en cuenta las particularidades en cuanto a crecimiento inicial y alometría propias de las edades jóvenes en repoblaciones. Además, no existen modelos o herramientas específicas que permitan realizar estimaciones *ex ante* de la biomasa fijada por la repoblación, a distintos marcos temporales y de gestión, requerimiento fundamental en el desarrollo y verificación de las iniciativas antes citadas.

2. Objetivos

El objetivo del informe es presentar la versión más reciente de los modelos para determinación *ex ante* de la biomasa fijada por hectárea repoblada en función de la edad, localización de plantación y densidad de plantación, con validez para las principales especies forestales empleadas en repoblaciones jóvenes (rango validez máximo 40 años) en la España peninsular. El presente informe completa y mejora los informes 01/2023, 01/2024 y 03/2024, presentados al MITERD el 08/06/2023, 28/02/2024 y

09/08/2024 respectivamente, y que están disponibles mediante solicitud al autor principal del presente informe.

La versión actual incluyendo nuevas parametrizaciones de los modelos, incorpora nuevos datos procedentes de las parcelas muestreadas a lo largo de 2024 y 2025, se aumenta el número de especies modelizadas, y se evalúa la inclusión del índice de Martonne como alternativa al uso de la precipitación anual y la temperatura media anual, que eran las variables utilizadas anteriormente. Se presentan asimismo nuevos modelos para grupos de especies. La principal diferencia con versiones anteriores radica en la evaluación del modelo de Chapman–Richards como alternativa al modelo potencial alométrico en la definición de los modelos bases de biomasa en función de la edad.

Al contrario que los informes anteriores, el informe actual se centra solamente en las ecuaciones y modelos que pueden ser aplicados directamente a la estimación *ex ante* de la biomasa fijada por ha repoblada en proyectos de absorción, por lo que se han ajustado modelos dependientes de la edad, la densidad actual de la plantación y parámetros de zonificación geográfica (ubicación de la repoblación) o variables climáticas medias. En el presente informe no se incluyen los modelos para la estimación de la biomasa total aérea fijada por hectárea repoblada no dependientes de la densidad de la plantación, que permiten su aplicación directa a las estadísticas anuales de superficie nacional repoblada, expresada por superficie repoblada por especie, según provincias y tipo de propiedad. Estos modelos serán presentados en otro informe.

Las estimaciones pueden referirse a marcos temporales de hasta 40 años de edad, aunque para la mayor parte de las especies de frondosas el rango máximo es de 30 años. Se han desarrollado modelos de biomasa por hectárea individuales para 28 de las principales especies utilizadas en repoblaciones en España desde 1993 (el número se refiere al código IFN). Para algunas especies (como *Quercus robur* y *Quercus petraea*, o *Juniperus thurifera*, *Juniperus oxycedrus* y *Juniperus phoenicea*) se presentan modelos conjuntos, mientras que para los castaños se han separado según uso preferente de la plantación (madera, principalmente *Castanea sativa* o fruto, con variedades híbridas):

1. *Pinus sylvestris* (21).
2. *Pinus pinea* (23).
3. *Pinus halepensis* (24).
4. *Pinus nigra* (25).
5. *Pinus pinaster* Mes. (26).
6. *Pinus pinaster* Atl. (26.1).
7. *Pinus radiata* (28).
8. *Pseudotsuga menziesii* (34).
9. *Larix* sp (35).
10. *Juniperus* sp. (37 + 38 + 39).
11. *Quercus robur* + *petraea* (41 + 42).
12. *Quercus pyrenaica* (43).
13. *Quercus faginea* (44).
14. *Quercus ilex* (45).
15. *Quercus suber* (46).
16. *Fraxinus* sp. (55).
17. *Eucalyptus globulus* (61).
18. *Eucalyptus nitens* (64).

19. *Olea europaea* (66).
20. *Ceratonia siliqua* (67).
21. *Castanea sativa* (producción madera) (72_m).
22. *Castanea hybrid*. (producción fruto) (72_f).
23. *Fagus sylvatica* (71).
24. *Betula* sp. (73).
25. *Juglans* sp. (75).
26. *Populus x hybrid* (258).
27. *Prunus avium* (395).
28. *Sequoia sempervirens*.
29. *Cryptomeria japonica*.

Para poder desarrollar modelos para las especies menos utilizadas, y/o no suficientemente representadas en las bases de datos de ajuste, se ha procedido a realizar una agrupación por tipologías o grupos de especies, incluyendo distintas especies con características ecológicas similares. Una vez definidas las tipologías se ha procedido a realizar al ajuste de los modelos a esos grupos.

El informe se complementa con un ejemplo de aplicación de los modelos desarrollados.

3. Datos de ajuste

Para el ajuste de los modelos de biomasa por ha se han utilizado distintas fuentes de datos. La primera fuente son las bases de datos propias, generadas en el marco del proyecto, y que incluyen 630 parcelas:

- a) Datos de la red de 230 parcelas instaladas por el INIA en repoblaciones jóvenes en el marco de la Encomienda EG-17-042-C2.2, entre septiembre de 2018 y noviembre de 2021.
- b) Datos de las 153 nuevas parcelas instaladas en el marco del proyecto de transferencia MITECO2023AF. 20234TE005 (vigente desde 1 enero de 2023) a fecha de 1 agosto de 2025, localizadas en Zaragoza, Guipúzcoa, Ourense, Asturias, Ávila, Valladolid, Cáceres, Huelva, Vizcaya, Madrid, Sevilla, Córdoba, Cádiz, Granada, Jaén, Guadalajara y Soria.
- c) Datos procedentes de la remediación de 60 parcelas instaladas por el INIA en repoblaciones jóvenes en el marco de la Encomienda EG-17-042-C2.2 entre 2019 y 2020, y remediadas en 2024 y 2025 (5 años después de la instalación) en el marco del citado proyecto de transferencia, en las provincias de Ávila, Burgos, Rioja, Madrid, Asturias, Valladolid y Vizcaya.
- d) Datos de 72 parcelas instaladas por el INIA en 2005-2006 en repoblaciones de entre 20 y 40 años de edad de *P. pinea*, *P. pinaster*, *P. sylvestris* y *P. nigra*, localizadas en distintas provincias de Andalucía y Castilla y León.
- e) Datos de 13 parcelas instaladas por el antiguo IFIE en la década de 1970 en plantaciones productivas en Vizcaya, realizadas con las especies *P. sylvestris*, *P. nigra*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii* y *Chamacyparis lawsoniana*.
- f) Base de datos del Observatorio de Forestación de Tierras Agrícolas, que incluye datos de 102 fincas repobladas en el marco del programa de forestación de tierras agrarias muestreadas en los años 2008-2010 por el MAPA.

Aparte de estas bases propias, se ha podido disponer de la información de 342 parcelas procedentes de distintas redes externas:

- Base de datos del sistema BASOKO, proporcionada por la fundación BASOA, que incluye 16 parcelas en repoblaciones localizadas en las tres provincias de la CCAA del País Vasco, y que incluyen principalmente especies de coníferas productivas.
- Base de datos pública del Inventario forestal del País Vasco, BASONET, de donde se ha podido determinar mediante ortofotografía el año de plantación en 76 parcelas en las provincias de Álava, Vizcaya y Guipúzcoa, principalmente de las especies *Pinus radiata*, *Pseudotsuga menziesii*, *Larix* sp., *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*.
- Base de datos de ENCE, que incluye 70 parcelas en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Galicia y Ppdo. de Asturias.
- Base de datos de la Universidad de Oviedo (UNIOVI) con 44 parcelas en repoblaciones de castaño localizadas en Galicia (Lugo, Ourense y Pontevedra).
- Base de datos de la *Unidade de Xestión Forestal Sostible* de la Universidad de Santiago de Compostela, que incluye 136 parcelas repobladas con *Pinus pinaster* Atl., *Pinus radiata* y *Betula* sp. en las cuatro provincias gallegas, León y Principado de Asturias.

Las Figuras 1 y 2 muestran la distribución geográfica de las parcelas muestreadas, según base de datos.

3.1. Características de las bases de datos y mediciones realizadas

A continuación, se presentan las particularidades de las bases de datos para el objetivo del presente informe, así como la forma de procesado que se ha llevado a cabo en cada una:

Red parcelas INIA

La base de datos de la red de 383 parcelas INIA recientes (bases A+B presentadas en el apartado anterior), las 60 remedidas (base C), y de las 85 parcelas antiguas (bases D+E) incluyen el valor de diámetro de tocón, diámetro normal (en plantas con altura superior a 1,30 m) y altura total de todas las plantas localizadas en cada parcela, identificadas además por su especie. Se ha procedido a calcular la biomasa individual de cada planta, empleando para ello las ecuaciones de biomasa individual por especie para repoblaciones jóvenes – en función del diámetro de tocón y altura total – presentadas en Menéndez–Miguélez et al. (2022). Para aquellas especies de las que no se dispone de ecuación propia se han empleado las ecuaciones por grupos de especie incluidas también en Menéndez–Miguélez et al. (2022). En el caso de las plantaciones con *Castanea* sp. y *Castanea x hybrid*. se han utilizado las ecuaciones de biomasa individual desarrolladas en Menéndez–Miguélez et al. (2023), mientras que para *E. globulus* y *E. nitens* se han empleado los modelos presentados en Calama et al. (2022). Para plantaciones de *Populus* sp. se han usado las ecuaciones en función del diámetro normal y la altura total presentadas en Menéndez–Miguélez et al. (2021). En el caso de *Ceratonia siliqua*, *Prunus avium* y *Juglans* sp., al no disponer aún de modelos de biomasa individual ajustados para plantaciones, se ha recurrido a la ecuación genérica de biomasa de frondosas disponible en Menéndez–Miguélez et al. (2022). Por último, para las especies de coníferas productivas establecidas en la región atlántica (*Pseudotsuga*, *Sequoia sempervirens*, *Larix* sp. y *Cryptomeria japonica*) se han calibrado

nuevos modelos o validado modelos existentes en la literatura, tal y como se describe en González–Gaarslev et al. (2025).

Observatorio FTA

Entre 2008 y 2010 el MAPA estableció una red de parcelas en repoblaciones realizadas en el marco del programa de Forestación de Tierras Agrarias, cuya finalidad era estudiar el grado de éxito del citado programa. Se seleccionaron 102 fincas (base de datos F), que cubrían las distintas provincias y especies empleadas, instalando entre 1 – 4 parcelas de 400 m² en cada finca. En estas parcelas se medía la altura total y el diámetro normal en las plantas con altura superior a 1,30 m, mientras que en las menores únicamente se contaba el total por parcela. En los pies mayores de 1,30 m de altura se ha procedido a calcular el diámetro de tocón a partir del diámetro normal, aplicando los modelos presentados en el informe 05/04 del proyecto MITECO2023AF. 20234TE005 (resultados inéditos), lo que permite aplicar las mismas ecuaciones que en el caso de las parcelas INIA.

Al objeto de homogeneizar esta base de datos con la base INIA, se ha procedido a estimar la altura media de los pies menores de 1,30, por parcela y especie, a partir de modelos ajustados con la base INIA en los que se estima este valor empleando como predictores el % de pies menores y la altura media de los pies mayores, por especie o grupos de especie. Una vez que se dispone de un valor de altura medida o estimada para cada planta de la base del observatorio FTA se ha procedido a calcular su biomasa individual utilizando las ecuaciones de biomasa en función de la altura, para especies (o grupos de especies en aquellas especies no representadas) indicadas en apartado anterior.

Redes externas

Las parcelas de las redes externas empleadas contienen datos de diámetros normales y alturas totales de todos los pies, así como datos generales sobre año de plantación, densidad, superficie de parcela y otros. Al no disponer del dato de diámetro de tocón para estimar la biomasa individual, se ha procedido de manera similar a la propuesta en el caso anterior, aplicando los modelos que permiten estimar la biomasa total en función el diámetro de tocón (utilizando las relaciones dtocón – dnormal desarrollados en el marco del presente proyecto) o en otras especies (p.ej. eucaliptos o plantaciones de coníferas productivas) utilizando los modelos desarrollados que utilizan el diámetro normal (junto con la altura) como variables predictoras de la biomasa individual.

4. Estimación de variables de interés

Para cada parcela incluida en las distintas bases de datos, una vez conocida la biomasa de cada árbol se ha procedido a estimar, para cada una de especies presentes, la biomasa total por parcela ($B_{parcela}$), como la suma de la biomasa de los pies individuales de la especie. Este valor se ha extrapolado posteriormente a la hectárea (B_{tot_ha}) en función de la superficie de cada parcela (Sup , m²) de muestreo (B_{ha}) (Ecuación 1).

$$B_{tot_ha} = 10000 \times \frac{B_{parcela}}{Sup} \quad (Ec. 1).$$

En el caso de repoblaciones mixtas, la extrapolación a la hectárea ha tenido en cuenta el porcentaje de ocupación de cada especie en la parcela, expresado en porcentaje de pies. Esta aproximación considera a las distintas especies de la parcela como si crecieran en subparcelas puras de superficie equivalente a su porcentaje de representación en la parcela total. De esta manera, si en una parcela de superficie S tenemos $N1$ pies de la especie 1, con una biomasa total $B1$, y $N2$ pies de la especie 2, con una biomasa total $B2$, la biomasa extrapolada a la ha de cada especie sería (Ecuación 2 y Ecuación 3):

$$Bha1 = B1 \frac{10000}{S} \frac{N1+N2}{N1} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$Bha2 = B2 \frac{10000}{S} \frac{N1+N2}{N2} \quad (\text{Ec. 3}).$$

El trabajar a escala de especies x parcela nos permite tener un total de 1459 observaciones en nuestra base, correspondientes a las 28 principales especies empleadas en las forestaciones (ver Tabla 1).

Las especies más representadas en la base (ver Tabla 1) son *Quercus ilex* (198 observaciones), *Pinus radiata* (145 observaciones), *Pinus halepensis* (127 observaciones), *Pinus pinea* (107 observaciones), *P. pinaster* Atl. (103 observaciones), *P. pinaster* Mes. (77 observaciones), *Quercus suber* (77 observaciones), *Pinus nigra* (72 observaciones), *Eucalyptus nitens* (70 observaciones) y *P. sylvestris* (60 observaciones). De *Castanea* sp. disponemos de 76 observaciones, correspondientes 41 a repoblaciones con fines de producción de fruto (normalmente realizadas con variedades híbridas) y 35 a repoblaciones con fines de producción maderera, que suelen usar *C. sativa*.

En la Tabla 1 del presente informe se recogen el número de observaciones disponibles (parcelas) por especie y clase de edad, así como el valor medio de biomasa total por ha. El cálculo de biomasa por hectárea ha sido posible para 27 de las 28 especies.

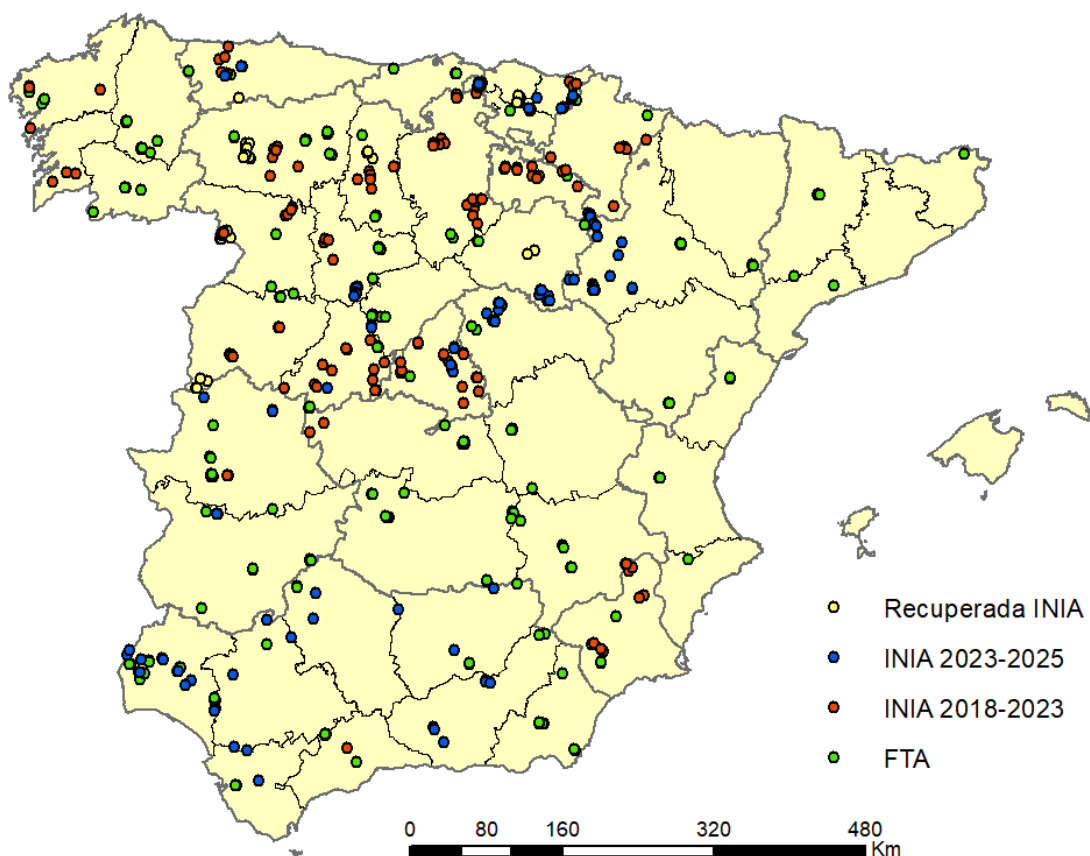


Figura 1. Ubicación de las parcelas INIA y FTA utilizadas en el ajuste de los modelos (ROJO: parcelas red INIA 2018-2023, AZUL: parcelas red INIA 2023-2025, VERDE: parcelas FTA, AMARILLO: parcelas INIA recuperadas).

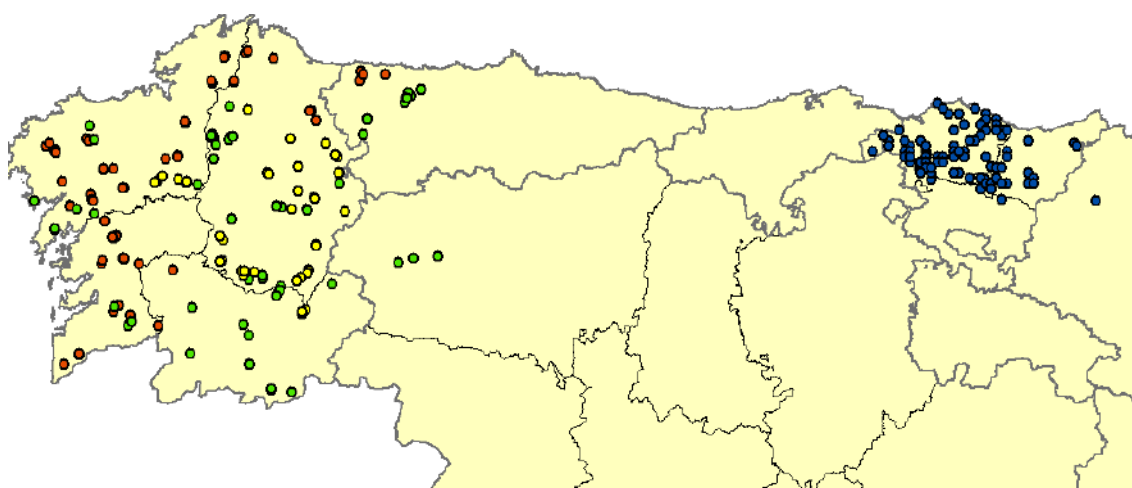


Figura 2. Ubicación de las parcelas externas usadas en la construcción de modelos de biomasa: red ENCE (ROJO), red BASOKO + BASONET (AZUL), red UNIOVI (AMARILLO) y red UXAFORES (VERDE).

Tabla 1. Número de parcelas y biomasa total aérea observada (kg M.S. ha⁻¹) según clases de edad, identificados en las redes de parcelas de repoblaciones. Solo se presentan los datos de aquellas especies con al menos cinco representaciones en la base de datos.

Especie	N total	Número de parcelas por clase de edad						Biomasa total (kg M.S. ha ⁻¹)					
		<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
<i>Pinus sylvestris</i>	60	3	10	16	11	9	11	384	3847	22141	61381	70406	88378
<i>Pinus pinea</i>	107	6	23	32	23	9	14	509	5192	19937	30033	41275	49158
<i>Pinus halepensis</i>	127	4	13	54	18	25	13	3378	1795	15763	23867	34966	45646
<i>Pinus nigra</i>	72	5	6	16	15	9	21	455	2964	28374	58630	32368	99625
<i>Pinus pinaster M.</i>	77	1	5	20	18	11	22	174	7887	23103	41640	58486	74168
<i>Pinus pinaster Atl</i>	103	21	11	14	19	24	14	2204	20917	85781	116589	124167	156998
<i>Pinus radiata</i>	145	4	7	11	35	43	45	1222	36926	122518	121190	116024	90513
<i>Juniperus sp</i>	25	2	3	12	3	3	2	165	125	593	1660	3017	4110
<i>Q. robur+petraea</i>	21	2	3	9	7			253	998	10415	45941		
<i>Q. pyrenaica</i>	17	4	2	4	5	1	1	8	5	5402	19220	1268	1192
<i>Quercus faginea</i>	43	4	3	18	7	9	2	22	68	6822	16985	6899	55247
<i>Quercus ilex</i>	198	14	22	109	24	17	12	97	300	5356	10393	23604	23561
<i>Quercus suber</i>	77	3	9	34	17	6	8	25	2569	11644	12752	71140	18734
<i>Fraxinus sp.</i>	16	1	2	6	5	2		56	1109	11506	17089	11690	
<i>Euc. globulus</i>	36	5	20	9	0	1	1	41984	123274	246757		108722	55640
<i>Eucalyptus nitens</i>	70	24	18	27	1			51731	132769	184149	38544		
<i>Olea europea</i>	28		3	15	1	8	1		211	5026	4902	6792	11524
<i>Ceratonia siliqua</i>	27			19			8			12352			11507
<i>Fagus sylvatica</i>	12		2	4	4		2		5706	27814	29709		143924
<i>Castanea x hyb</i>	41	3	16	11	9		2	335	2792	10035	14105		22458
<i>Castanea sativa</i>	35	6	13	11	4	1		513	7345	34705	49383	96218	
<i>Betula sp.</i>	32	3	3	8	1	3	14	291	2738	11585	64002	113870	126324
<i>Juglans sp.</i>	17			12	5					7959	5927		
<i>Populus x hybrid</i>	16	10	5	1				2747	51512	165555			
<i>Sequoia semp.</i>	11	2	1	2	3	1	2	2914	5457	51410	85227	405627	433860
<i>Pseudotsuga</i>	20		3	2	3	7	5		4565	63422	66324	108255	145507
<i>Larix sp</i>	8		1	4	2		1		3003	43144	77940		155511
<i>Criptomeria jap.</i>	6	4	1				1	3850	498				327177
<i>Prunus avium</i>	12		2	8	2				3868	32391	12898		

N: número de parcelas de muestreo donde aparece la especie.

5. Definición de la tipología de grupos de especies

Al objeto de definir la tipología de grupos de especies se ha procedido a unir las observaciones de distintas especies según zonas geográficas, resultando en un total de seis grupos de especies:

- Coníferas productivas del medio atlántico (CONIF_ATL): *Pinus radiata*, *Pinus pinaster* Atl., *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Sequoia*, *Pseudotsuga*, *Larix*, *Cryptomeria* y resto de coníferas plantadas en la zona atlántica. Puede usarse para coníferas plantadas en el medio atlántico que no dispongan de modelo específico (*Chamaecyparis*, *Tsuga*, *Pinus taeda*, *Cryptomeria*).
- Coníferas mediterráneas (CONIF_MED): *Pinus halepensis* y *Pinus pinea* en el medio mediterráneo y árido. Validez para repoblaciones con *Cupressus*, *Cedrus* y otras coníferas usadas en el medio mediterráneo.
- Coníferas de montaña (CONIF_MONT): *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* de todas las zonas (salvo atlántica). Podría tener validez para plantaciones con *Abies sp.*, *Pinus uncinata*, *Cedrus sp.* y otras en zonas de montaña.
- Frondosas caducifolias del medio atlántico (FROND_CAD_ATL): *Quercus robur* + *petraea*, *Fagus sylvatica*, *Betula sp.*, *Prunus avium*, *Quercus rubra*, con validez para frondosas caducifolias plantadas en el medio atlántico que no dispongan de modelo propio.
- Frondosas caducifolias del medio mediterráneo (FROND_CAD_MET): *Fraxinus sp.*, *Celtis*, *Fagus*, *Prunus avium*, *Quercus petraea*, *Juglans*, *Celtis*, con validez para frondosas caducifolias plantadas en el medio mediterráneo y que no disponen de modelo propio (ej. *Prunus sp.*, *Juglans*, *Celtis*, *Ulmus*).
- Frondosas perennifolias de medio mediterráneo (FROND_PER_MED): *Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Olea europea* y *Ceratonia siliqua*. Válido para otras perennifolias mediterráneas que no disponen de ecuación propia.

6. Construcción de modelos

6.1. Modelo base

Para la construcción de modelos para la biomasa total aérea por hectárea (B_{tot_ha}), expresada en kg M.S. ha^{-1} en función de la edad de la plantación (años), se han empleado como modelo base dos ecuaciones diferentes, el modelo alométrico (Ecuación 1) y el modelo de Richards–Chapman (Ecuación 2):

$$B_{tot_ha} = a \cdot edad^b \quad (\text{Ec. 1}),$$

$$B_{tot_ha} = a \cdot [1 - \exp(-b \cdot edad)]^c \quad (\text{Ec. 2}),$$

donde a , b y c representan los parámetros a estimar.

Ambos modelos han sido elegidos entre los numerosos modelos de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal (Kiviste et al. 2002), por sus propiedades. Ambas son funciones estrictamente crecientes con la edad, y representan el patrón de crecimiento inicial, de tipo potencial, en las edades iniciales tras la plantación. El modelo de Richards representa una serie de ventajas adicionales, como son el disponer de punto de inflexión, que permite representar la reducción que se produce en la tasa de crecimiento



transcurridas las fases iniciales. Asimismo, el modelo asume la existencia de una asíntota (parámetro a de la ecuación 2), lo que por un lado facilita el uso del modelo fuera del rango de edades muestreado, y por otro permite que este parámetro sea fácilmente asociable a otras variables de tipo climático, zonal o específicos de la plantación (densidad). Sin embargo, la convergencia del modelo de Richards es más compleja, especialmente para aquellas especies en las que la muestra aún no ha alcanzado su máxima tasa de crecimiento. En cualquier caso, y ante similitud en el comportamiento de ambos modelos, se seleccionará el modelo de Richards.

6.2. Expansión de los modelos mediante inclusión de la densidad y ubicación

Se plantea la expansión de los modelos base definidos en las Ecuaciones 1 y 2 mediante la inclusión de la densidad de la plantación, definida por el número de pies por hectárea (N) presentes en la plantación. En el caso del modelo alométrico se plantea la expansión de los parámetros a y b (ambos, o sólo uno de ellos, Ecuación 3), mientras que en el caso del modelo de Richards únicamente se plantea la expansión del parámetro de asíntota a (Ecuación 4):

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]} \quad (\text{Ec. 3}),$$

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c \quad (\text{Ec. 4}).$$

Localización mediante variable climática media

Un objetivo en la construcción de los modelos es que sean lo más explícitos desde el punto de vista espacial, y que recojan las posibles diferencias en biomasa observadas entre territorios en repoblaciones realizadas con la misma especie y similar densidad de plantación. Para ello, en una siguiente fase, se propone la inclusión de una variable de tipo climático media anual (X_{cl}), habiéndose evaluado la entrada de tres posibles variables climáticas derivadas de los modelos de la AEMET:

- Precipitación media anual (pp_m , expresada en mm).
- Temperatura media anual (tm , °C).
- Índice de aridez de Martonne, definido como $M = pp_m/(tm+10)$.

Estas variables se han calculado a partir de los modelos de celda de la AEMET, para una malla 1 km x 1 km, y para el periodo de referencia 1990 – 2010 (<https://agroclimap.aemet.es/#>). La entrada de la variable climática en el modelo se realiza con la expansión del parámetro b en el caso del modelo alométrico (Ecuación 5), y nuevamente mediante la expansión del parámetro a de asíntota en el modelo de Richards (Ecuación 6):

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N + b_2 X_{cl}]} \quad (\text{Ec. 5}),$$

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N + a_2 X_{cl}] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c \quad (\text{Ec. 6}).$$

Localización mediante zonificación geográfica

Una alternativa a la entrada en el modelo de una variable de tipo climático media es el ajuste de los modelos 3 y 4 por diferentes zonas geográficas, definidas de acuerdo a criterios litológicos y climáticos amplios (ver mapa en Figura 3):

- **Zona Atlántica (ATL):** incluye las Comunidades Autónomas de Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco.
- **Meseta Norte y Valle Ebro (MN):** Comunidades de Castilla León (salvo Salamanca y Zamora), Aragón, la Rioja y Navarra.
- **Centro – Levante (CLEV):** Comunidad de Madrid, Castilla la Mancha, Jaén, Cataluña y Comunidad Valenciana (salvo Alicante).
- **Sur y Occidente (OCC):** Zamora + Salamanca + Extremadura + Andalucía (salvo Jaén, Almería y Granada).
- **SE Árido (AR):** Almería + Granada + Murcia + Alicante.

La asignación de las provincias a cada zona se incluye en la Tabla del anexo A1. Esta zonificación se ha utilizado, con algunas variantes, en el ajuste de algunas de las principales especies individuales, así como en las tipologías de grupo de especie. Para algunas especies individuales, con escasa representación en la muestra de ajuste y/o poca variabilidad geográfica, no ha sido posible realizar una zonificación geográfica, presentando un único modelo y asumiendo que tiene validez para todas las zonas geográficas consideradas.



Figura 3. Mapa de las cinco grandes zonas territoriales para localización de los modelos de repoblaciones.

La entrada de la zonificación geográfica en los modelos se realiza mediante una variable de tipo dummy (Z_1), que adopta un valor 1 en el caso de que la observación provenga de la zona, y 0 en el caso contrario. Se evaluará la entrada de la zonificación regional en los modelos definidos por las ecuaciones 3 y 4 (Ecuación 7 y Ecuación 8):

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N + a_2 Z_1] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N + b_2 Z_1]} \quad (\text{Ec. 7}),$$

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N + a_2 Z_1] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c \quad (\text{Ec. 8}).$$

En el ajuste del modelo se incluyen tantas variables ficticias como zonas geográficas de ajuste se planteen, menos una, dando lugar al final a un modelo para cada zona.

Para cada especie (o grupo de especies) se ha realizado de manera individual el ajuste de los modelos 1 – 8, habiéndose comparado además en el caso de los modelos derivados de la ecuación alométrica las posibles combinaciones de expansión de ambos parámetros o de uno sólo de ellos. Asimismo, en el caso de los modelos localizados mediante una variable de tipo climático se ha comparado la entrada de *pp_m*, *tm* o *Martonne*. Los distintos modelos ajustados se han comparado en términos del criterio de información de Akaike (AIC) y del estadístico R^2_{adj} . Para cada especie o grupo de especies se ha seleccionado el modelo con menor AIC, mayor R^2_{adj} , y que presente un mayor nivel de significación estadística en los parámetros. Dada la heterocedasticidad inherente a los modelos 1 y 2, así como a sus expansiones, el ajuste de los modelos se realiza mediante regresión no lineal ponderada, ajustando la función de varianza como potencia de la edad. Excepcionalmente, en el caso de que en alguna especie no se alcanzase convergencia de ningún modelo para la biomasa total, se ha propuesto la construcción de los mismos modelos, pero usando como variable dependiente la biomasa del árbol medio. Todos los ajustes se han realizado con PROC NLIN del paquete de acceso libre SAS ODA.

7. Resultados (I): modelos desarrollados para especies individuales

De las 28 especies identificadas como principales en la Tabla 1 (representación en la base de datos > 5 observaciones) ha sido posible ajustar modelos individuales para 25 de ellas, no siendo posible ajustar un modelo individual para tres de ellas: *Juglans sp.*, *Prunus avium* y *Cryptomeria japonica*. En los tres casos se trata de especies poco representadas en la base de datos, y con muy poca dispersión en cuanto a la edad de las plantaciones muestreadas. Para las otras especies muestreadas ha sido posible ajustar modelos en función de la densidad, salvo para las plantaciones productivas de *Populus x deltoides*, donde únicamente se pudo ajustar el modelo base de tipo alométrico (Ecuación 1). Esto se debió a que todas las plantaciones muestreadas se han realizado con marcos muy similares (de 5 m x 6 m a 6 m x 6 m), corresponden a una única región (Cuenca del río Duero), y han sido todas realizadas a raíz profunda.

Para las otras 24 especies ha sido posible ajustar modelos dependientes de la densidad, y en 20 de ellas modelos que dependen de la densidad y de un parámetro climático medio. En cuanto a los modelos para zonas, en nueve de las especies ha sido posible definir una zonificación regional, mientras que en las quince especies restantes se presenta un modelo con validez única para toda la zona muestreada. La variable climática utilizada principalmente ha sido la precipitación media anual (14 de las 20 especies), mientras que Martonne se ha utilizado en tres (*Fagus sylvatica*, *Quercus robur* + *petraea* y *Pinus pinea*) y la temperatura media en 2 (*Pinus sylvestris* y *Pinus radiata*). En el caso de *Quercus ilex* entran en el modelo tanto la precipitación media como la

temperatura media. Las ecuaciones derivadas del modelo de Richards (Ecuación 2) han sido las seleccionadas para la mayor parte de las especies de *Pinus* (salvo *P. halepensis* y *P. nigra*), los eucaliptos, *Pseudotsuga menziesii*, *Betula sp.* y *Quercus pyrenaica*, mientras que para el resto de especies se presentan modelos derivados de la ecuación alométrica (Ecuación 1). Por último, para *Quercus faginea* no ha sido posible ajustar ningún modelo para la biomasa total por hectárea, presentándose modelos para la biomasa del árbol medio en función de la densidad de la plantación y parámetros climáticos. En la Tabla 2 se resumen los modelos. En general, los modelos han presentado mejor ajuste y mayor robustez en la estimación de los parámetros para las especies de *Pinus* que para las frondosas.

Tabla 2. Resumen de los modelos ajustados para especies individuales (Modelo: modelo base seleccionado; X_CI: variable climática de tipo medio usado; Zonas: número de zonas geográficas definidas)

Especie	Modelo	X_CI	Zonas	Especie	Modelo	X_CI	Zonas
<i>Pinus sylvestris</i>	Richards	tm	2	<i>Quercus suber</i>	Alométrica	pp_m	2
<i>Pinus pinea</i>	Richards	Martonne	2*	<i>Fraxinus sp.</i>	Alométrica	–	Única
<i>Pinus halepensis</i>	Alométrica	pp_m	3	<i>Euc. Globulus</i>	Richards	pp_m	Única
<i>Pinus nigra</i>	Alométrica	pp_m	2	<i>Eucalyptus nitens</i>	Richards	pp_m	Única
<i>Pinus pinaster M.</i>	Richards	pp_m	2	<i>Olea europaea</i>	Alométrica	pp_m	2
<i>Pinus pinaster Atl</i>	Richards	pp_m	Única	<i>Ceratonia siliqua</i>	Alométrica	pp_m	Única
<i>Pinus radiata</i>	Richards	tm	Única	<i>Fagus sylvatica</i>	Alométrica	Martonne	Única
<i>Juniperus sp</i>	Alométrica	–	Única	<i>Castanea sp</i>	Alométrica	pp_m	Única
<i>Q. robur+petraea</i>	Alométrica	Martonne	Única	<i>Betula sp</i>	Richards	pp_m	Única
<i>Q. pyrenaica</i>	Richards	–	Única	<i>Sequoia semp.</i>	Alométrica	–	Única
<i>Quercus faginea</i>	Alométrica	tm**	Única**	<i>Pseudotsuga</i>	Richards	pp_m	Única
<i>Quercus ilex</i>	Alométrica	pp_m + tm	4	<i>Larix sp</i>	Alométrica	pp_m	Única
				<i>Populus x hyb</i>	Alométrica	–	Única***

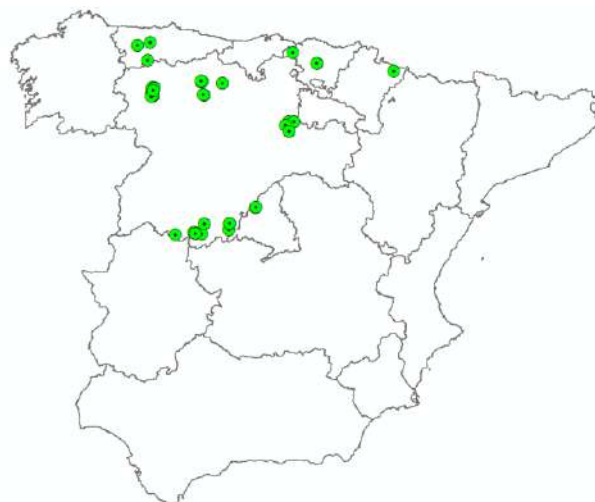
Nota: tm: temperatura media anual (°C), pp_m: precipitación media anual (mm); *el modelo zonificado para *P. pinea* es derivado de la ecuación alométrica; **: para *Q. faginea* los modelos ajustados son para la variable dependiente biomasa del árbol medio *bm*; ***: para *Populus x hybrid* no ha sido posible ajustar modelos dependientes ni de variable de tipo climático ni de la densidad de la plantación, habiéndose ajustado únicamente el modelo base.

A continuación, se presentan fichas con la parametrización de los modelos por especie individual para las 25 especies en las que ha sido posible el ajuste. En las fichas se incluyen además rangos de edad, densidad y variables climáticas muestreadas en las plantaciones empleadas en el ajuste de los modelos. Se aconseja no emplear los modelos fuera del rango de las variables muestreadas.

Pinus sylvestris L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	18,8	5	42
Densidad (pies/ha)	1420	504	2900
pp_m (mm)	855	528	1466
Tm (°C)	9,6	5,7	11,5
Martonne	43,9	25,4	93,1



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11– 15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ ha)	384	3847	22141	61381	70406	88378
bm (kg)	0,28	2,87	12,97	38,54	45,05	125,10
hm (m)	0,79	1,53	3,92	7,60	8,61	13,79
N (pies/ha)	1270	1427	1651	1617	1646	737

Provincias muestreadas: 5, 9, 24, 28, 31, 33, 34, 48 (códigos en anexo A1).

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 60.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
21	63,92%	1230,3	86304,9	-0,2734	54,991

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
21-tm	72,11%	1204,4	tm	39,7811	6715,3	-0,1343	9,1905

Modelo dependiente de densidad y zonificación

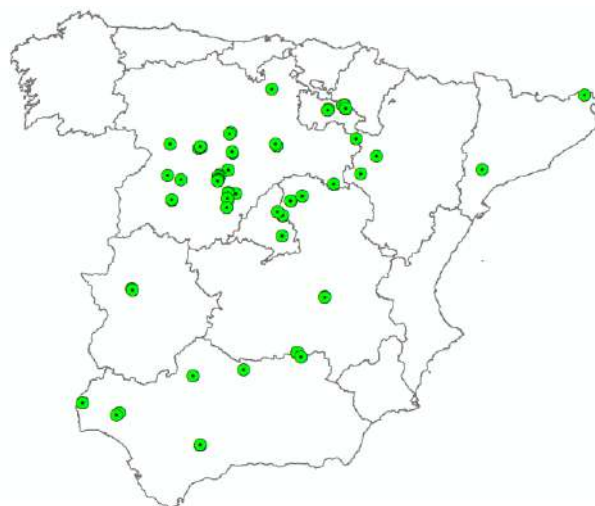
$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
1: Todas zonas salvo ATL	21-1	72,65%	1205,5	45708,1	47,0577	-0,1388	9,6515
2: ATL	21-2			92934,2	47,0577	-0,1388	9,6515

Pinus pinea L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	15,7	1	35
Densidad (pies/ha)	887	196	2375
pp_m (mm)	480	386	770
Tm (°C)	12,7	9,4	17,9
Martonne	21,2	17,3	38,2



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11- 15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	509	5192	19937	30033	41275	49158
bm (kg)	0,48	6,75	25,28	38,10	60,87	75,24
hm (m)	0,58	1,45	3,15	4,20	5,36	6,06
N (pies/ha)	789	942	938	935	859	662

Provincias muestreadas: 5, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 28, 29, 34, 37, 40, 42, 47, 49, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 107.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
23	57,69%	2035,2	54302,2	-0,1348	5,9076

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1 N + a_2 x_{cl}] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
23-Mtn	62,01%	2025,7	Martonne	37,5887	1657,3	- 0,0998	4,5652

Modelo dependiente de densidad y zonificación

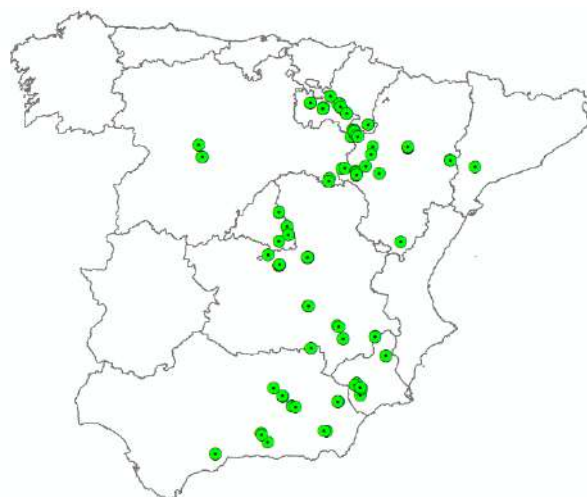
$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: Todas zonas salvo 23-2	23-1	66,13%	2017,4	544,2	- 0,2332	1,1515	0,000438
2: Provincias: 9, 25, 26, 31, 42, 44, 50	23-2			544,2	- 0,2332	1,1355	0,000438

Pinus halepensis Mill.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,3	2	35
Densidad (pies/ha)	867	178	2375
pp_m (mm)	428	265	592
Tm (°C)	13,4	10,5	16,9
Martonne	18,5	10,2	27,6



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11– 15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	3378	1795	15763	23867	34966	45646
bm (kg)	3,82	1,60	19,87	24,45	42,33	64,25
hm (m)	1,27	0,94	3,38	3,97	5,23	6,90
N (pies/ha)	805	1107	752	1079	881	797

Provincias muestreadas: 1, 2, 4, 16, 18, 22, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 42, 44, 45, 47, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 127.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
24	39,42%	2452,8	400,2	1,4166

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
24_pp	55,16%	2420,6	pp_m	730,9	-0,3265	0,8264	0,000334	0,000492

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: MN	24-1	55,40%	2419,9	94,8180	0,1631	1,5801	–
2: CLEV + OCC	24-2			94,8180	0,1631	1,7621	–
3: AR	24-3			94,8180	0,1631	1,4805	–

Pinus nigra J.F. Arnold

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	19,3	3	38
Densidad (pies/ha)	1144	203	2083
pp_m (mm)	852	475	1843
Tm (°C)	10,4	8,7	13,2
Martonne	41,3	23,5	85,3



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11- 15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	455	2964	28374	58630	32368	99625
bm (kg)	0,39	2,32	20,36	67,57	50,60	120,35
hm (m)	0,84	1,57	3,94	6,66	4,81	10,58
N (pies/ha)	1120	1140	1506	993	1071	1014

Provincias muestreadas: 1, 5, 9, 19, 20, 24, 31, 34, 42, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 72.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
25	39,12%	1543,5	441,7	1,5812

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
25_pp	56,43%	1523,4	pp_m	124,3		1,4993	0,000260	0,000235

Modelo dependiente de densidad y zonificación

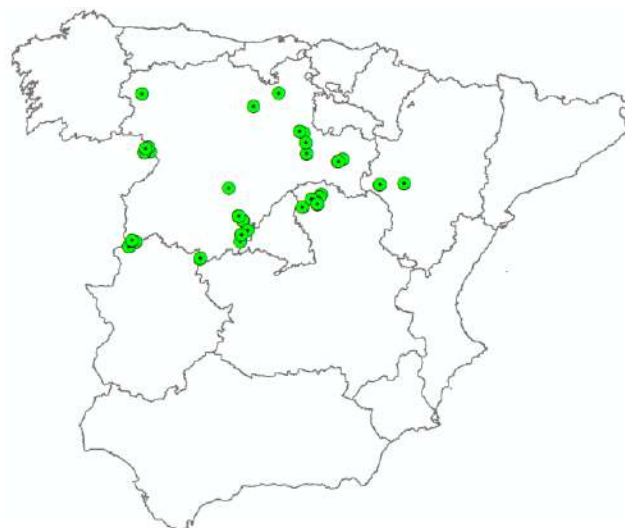
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: Todas zonas salvo ATL	25-1	61,56%	1514,4	132,5		1,5482	0,000301
2: ATL	25-2			132,5		1,8616	0,000301

Pinus pinaster Ait. subsp. *mesogeensis*

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	21,0	4	41
Densidad (pies/ha)	1124	323	3133
pp_m (mm)	696	407	1395
Tm (°C)	11,3	8,7	15,5
Martonne	32,6	17,7	62,6



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11- 15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	174	7887	23103	41640	58486	74168
bm (kg)	0,26	4,93	14,60	36,73	57,65	111,20
hm (m)	0,53	1,91	3,43	5,64	7,30	10,49
N (pies/ha)	675	1533	1474	1182	1017	739

Provincias muestreadas: 5, 9, 19, 24, 37, 42, 47, 49, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 77.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
26	44,13%	1576,1	88788	-0,1031	4,5295

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1 N + a_2 x_{cl}] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
26_pp	65,51	1541,0	pp_m	91,3993	68,6561	-0,0697	3,9530

Modelo dependiente de densidad y zonificación

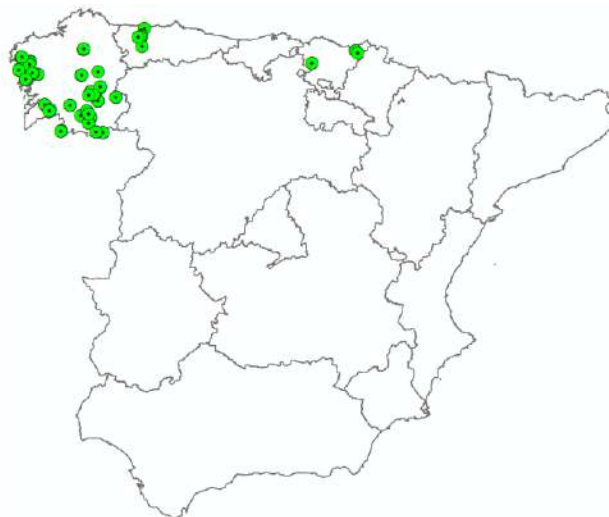
$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
1: OCC	26-1	61,88%	1550,7	54979	85,4161	-0,0818	4,4075
2: Resto zonas salvo ATL	26-2			17149	85,4161	-0,0818	4,4075

Pinus pinaster Ait. subsp. *atlantica*

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,4	3	47
Densidad (pies/ha)	951	275	2236
pp_m (mm)	1404	791	2547
Tm (°C)	12,3	10,5	14,6
Martonne	62,8	36,2	113,5



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11– 15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	2204	20917	85781	116589	124167	156998
bm (kg)	2,60	18,86	75,03	124,22	170,74	230,01
hm (m)	1,59	5,19	9,44	13,01	14,84	16,69
N (pies/ha)	814	1118	1241	1017	837	843

Provincias muestreadas: 1, 15, 20, 27, 32, 33, 36.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 103.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
26_1	81,71%	2016,6	172767	-0,1204	3,8913

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1 N + a_2 x_{cl}] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
26_1_pp	88,28%	2062,84	pp_m	176,9	131,0	-0,0467	2,2380

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
ATL	26_1-1	85,24%	2086,5	147921	58,3242	-0,0935	3,2372

Pinus radiata D. Don.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	21,7	1	42
Densidad (pies/ha)	696	56	3133
pp_m (mm)	1269	573	1770
Tm (°C)	12,1	9,5	13,6
Martonne	57,4	26,7	77,6



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	1222	36926	122518	121190	116024	90513
bm (kg)	1,21	45,57	130,88	139,27	232,97	406,83
hm (m)	1,57	8,83	14,31	15,97	20,10	23,68
N (pies/ha)	1037	942	1092	1139	622	256

Provincias muestreadas: 1, 15, 20, 24, 27, 32, 33, 39, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 145.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
28	21,22%	3110,1	110065	-0,9076	3264,7

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
28_tm	47,01%	3054,6	pp_m	111,1	6515,6	-0,0927	2,1817

Modelo dependiente de densidad y zonificación

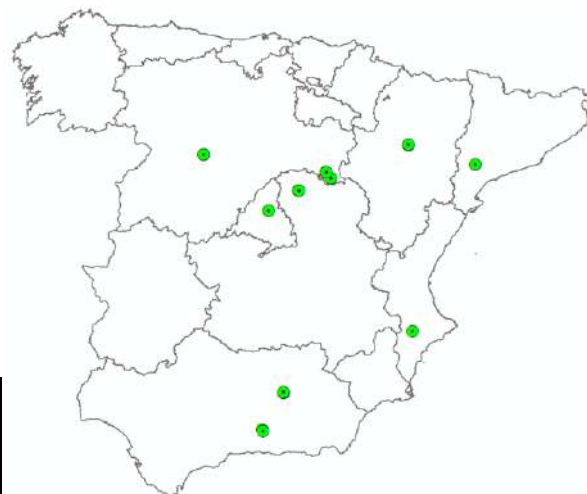
$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
ATL	28-1	49,80%	3046,7	80348,3	88,4160	-0,1161	2,5200

Juniperus sp. (*Juniperus communis* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Juniperus phoenicea* L., *Juniperus thurifera* L.)

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	14,9	4	28
Densidad (pies/ha)	1079	326	5384
pp_m (mm)	474	376	594
Tm (°C)	12,4	10,1	14,6
Martonne	21,3	15,3	28,5



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	165	125	593	1660	3017	4110
bm (kg)	0,04	0,12	0,71	1,75	4,73	8,67
hm (m)	0,51	0,39	0,85	1,66	1,90	3,29
N (pies/ha)	4406	949	827	842	625	494

Provincias muestreadas: 3, 18, 19, 23, 25, 28, 42, 47, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 25.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
37	51,68%	355,2	1,5629	2,3709

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático: No se consigue convergencia de ningún modelo.

Modelo dependiente de densidad y zonificación

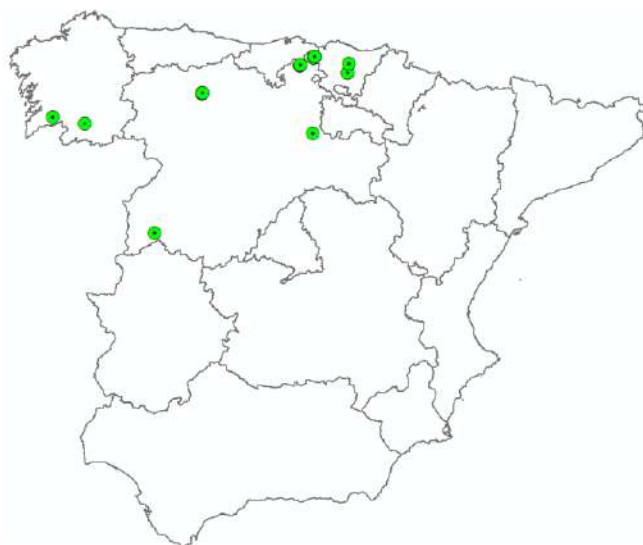
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	37-1	62,63%	352,8	0,3674		2,6605	0,000263

Quercus robur L. y *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,1	4	20
Densidad (pies/ha)	1397	233	2650
pp_m (mm)	1089	584	1697
Tm (°C)	11,1	9,8	12,7
Martonne	51,5	27,9	74,6



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años
Btot_ha (kg/ha)	253	998	10415	45941
bm (kg)	0,25	0,61	5,55	33,78
hm (m)	1,84	1,32	3,64	6,77
N (pies/ha)	1040	1326	1639	1217

Provincias muestreadas: 9, 20, 24, 32, 36, 37, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 21.

Modelo base: No se alcanza convergencia de ningún modelo base.

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
42_Mtn	56,70%	428,7	Martonne	3,8472		2,4264	0,0015	0,000322

Modelo dependiente de densidad y zonificación

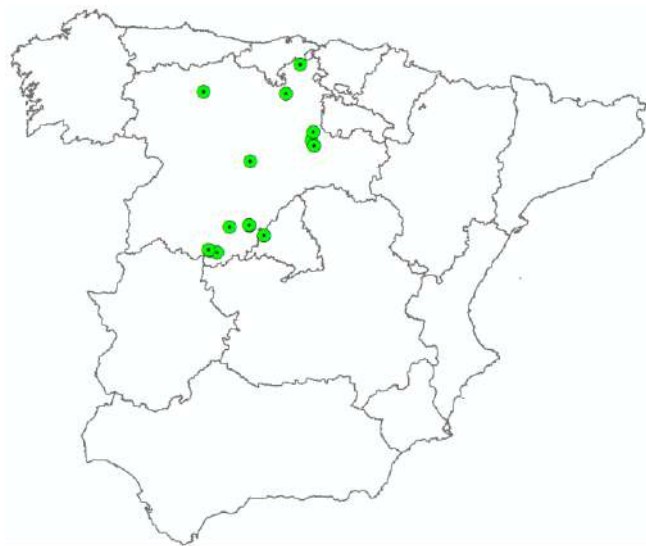
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	42–1	53,77%	430,1	–0,0367	0,00231	3,0954	

Quercus pyrenaica Willd.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	14,1	3	30
Densidad (pies/ha)	1184	249	2415
pp_m (mm)	706	457	1012
Tm (°C)	9,9	8,7	11,0
Martonne	35,5	22,3	51,0



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	8	5	5402	19220	1268	1192
bm (kg)	0,01	0,01	2,67	9,44	0,91	1,43
hm (m)	0,30	0,35	1,59	3,41	1,23	1,65
N (pies/ha)	1095	469	1527	1293	1398	833

Provincias muestreadas: 5, 9, 24, 28, 47

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 17

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp(b \cdot edad)]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
43	9,43%	343,5	16141,6	-0,4947	1163,5

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático: No se alcanza convergencia de ningún modelo

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1 N]. [1 - \exp(b \cdot edad)]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
Única	43-1	36,54%	339,4	-81160,3	218,2	-0,0006	0,6495

Nota: modelo en el que hubo que modificar criterios de convergencia. No utilizar con valores de densidad inferior a 500 pies/ha.

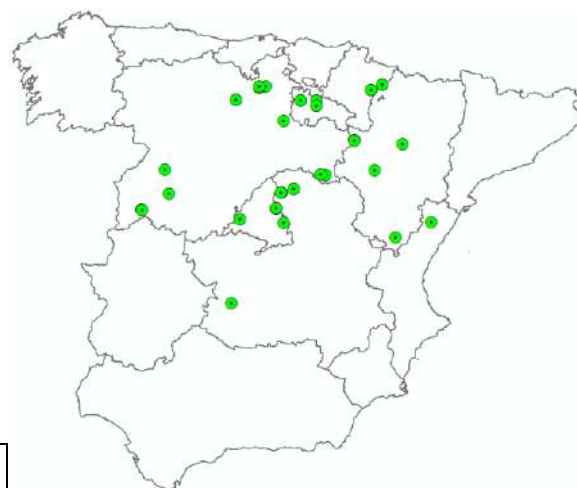
Quercus faginea Lam.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	15,3	3	30
Densidad (pies/ha)	948	86	1835
pp_m (mm)	605	409	929
Tm (°C)	11,8	9,4	14,3
Martonne	28,1	16,8	44,8

Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	22	68	6822	16985	6899	55247
bm (kg)	0,03	0,06	8,10	13,92	7,95	65,85
hm (m)	0,30	0,33	2,22	3,52	1,72	6,42
N (pies/ha)	850	838	893	955	1158	842



Provincias muestreadas: 9,

12, 13, 19, 26, 28, 31, 37, 42, 44, 49, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 43.

Modelo base

$$bm = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
44	39,65	228,5	0,000022	4,3401

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$bm = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
44_tm	44,10%	229,49	tm	0,000033		4,0360	0,0336	-0,00022

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$bm = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	44-1	43,36%	229,16	0,000105		4,1428	-0,00029

Nota: para *Quercus faginea* no se han podido ajustar modelos para la biomasa total por hectárea, sino para la biomasa del árbol medio (*bm*). Para dar valores predichos de biomasa por hectárea multiplicar el valor predicho de *bm* por el número de pies por hectárea de la repoblación.

Quercus ilex L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	14,5	1	31
Densidad (pies/ha)	751	125	5384
pp_m (mm)	545	265	948
Tm (°C)	14,0	8,7	18,6
Martonne	23,0	10,2	40,8



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	97	300	5356	10393	23604	23561
bm (kg)	0,05	0,75	10,61	16,28	27,71	40,68
hm (m)	0,38	0,58	1,47	2,56	2,53	2,94
N (pies/ha)	1309	774	688	666	858	644

Provincias muestreadas: 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 37, 41, 42, 44, 45, 47, 49, 50.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 198.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
45	20,19%	3802,0	9,3424	2,4145

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

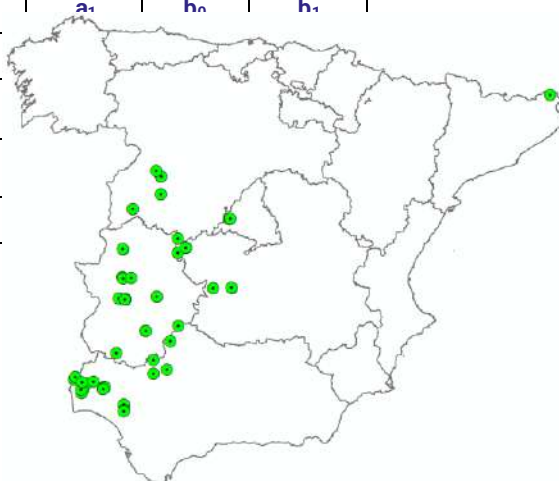
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl1} + b_2 x_{cl2} + b_3 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl1}	x _{cl2}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
45_Xcl	43,40%	3739,2	pp_m	tm	1,2437		1,4275	0,000725	0,0667	0,000433

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: MN	45-1	54,40%	3695,1	0,0415			
2: CLEV + Salamanca + Zamora + Extremadura	45-2			0,0415			
3: Andalucía (salvo Almería y Granada)	45-3			0,0415			
4: Árido	45-4			0,0415			



Modelos ex ante de biomasa total para repoblaciones

Quercus suber L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	15,8	4	30
Densidad (pies/ha)	510	28	1760
pp_m (mm)	595	450	948
Tm (°C)	15,7	11,1	18,6
Martonne	23,3	17,8	37,2

Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	25	2569	11644	12752	71140	18734
bm (kg)	0,03	5,96	29,49	29,84	92,80	67,66
hm (m)	0,46	1,55	3,31	3,81	6,10	5,38
N (pies/ha)	783	449	562	402	722	326

Provincias muestreadas: 5, 6, 10, 13, 14, 17, 21, 28, 37, 41, 45, 49.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 77.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
46	16,33%	1542,8	57,1191	1,9934

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl1}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
46_pp	80,22%	1437,7	pp_m	62,0801	-0,0350	0,9141	0,00107	0,00102

Nota: modelo válido con densidades de plantaciones inferiores a 1600 pies/ha.

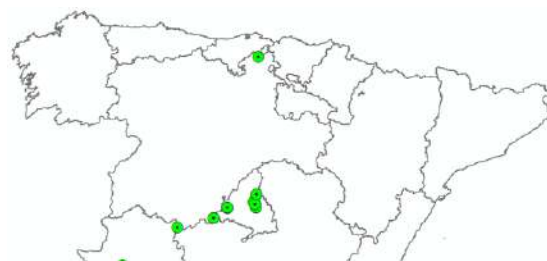
Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: Provincias 5, 13, 14, 28, 28, 37, 45, 49 (interior)	46-1	71,71%	1463,3	54,9898		1,4563	0,000569
2: Resto de zonas (Extremadura+ Andalucía Occ + Cataluña)	46-2			54,9898		1,7300	0,000569

Fraxinus spp.

Modelos ex ante de biomasa total para repoblaciones



Rangos muestrados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	15,8	4	30
Densidad (pies/ha)	510	28	1760
pp_m (mm)	595	450	948
Tm (°C)	15,7	11,1	18,6
Martonne	23,3	17,8	37,2

Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	25	2569	11644	12752	71140	18734
bm (kg)	0,03	5,96	29,49	29,84	92,80	67,66
hm (m)	0,46	1,55	3,31	3,81	6,10	5,38
N (pies/ha)	783	449	562	402	722	326

Provincias muestreadas: 5, 9, 10, 28.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 16.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
55	11,12%	312,0	140,7	1,6271

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático: No se alcanza convergencia de ningún modelo dependiente de densidad y parámetro climático.

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	55–1	76,29%	294,9	84,0414		1,4666	0,00108

Olea europaea L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,1	6	27
Densidad (pies/ha)	334	152	725
pp_m (mm)	364	248	626
Tm (°C)	15,6	13,9	18,3
Martonne	14,2	8,8	22,9



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	–	211	5026	4902	6792	11524
bm (kg)	–	0,59	14,21	14,71	23,01	29,93
hm (m)	–	0,40	1,46	2,67	1,96	2,86
N (pies/ha)	–	364	345	333	296	385

Provincias muestreadas: 4, 6, 11, 13, 14, 21, 28, 29, 30.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 28.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
66	7,78%	493,6	598,1	0,7881

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
66_pp	28,42%	490,5	pp_m	213,7		0,3467	0,00129	0,00095

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
1: Árido	66–1	33,36%	488,5	145,5		0,7382	0,00119
2: Resto de zonas	66–2			145,5		1,1657	0,00119

Ceratonia siliqua L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	17,2	11	30
Densidad (pies/ha)	346	50	1025
pp_m (mm)	515	248	708
Tm (°C)	17,3	15,9	18,3
Martonne	18,9	8,8	26,1



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	–	–	16510	–	–	11507
bm (kg)	–	–	42,71	–	–	47,57
hm (m)	–	–	3,19	–	–	3,92
N (pies/ha)	–	–	376	–	–	275

Provincias muestreadas: 4, 11, 21, 29, 30, 41, 43.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 27.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
67	2,50%	443,7	4621,9	0,2842

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
67–pp	29,53%	439,5	pp_m	1787,7			0,00103	0,000141

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	67–1	9,7%	445,7	4234,2		0,1094	0,000667

Fagus sylvatica L.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	17,7	10	42
Densidad (pies/ha)	1236	283	2000
pp_m (mm)	1451	691	1843
Tm (°C)	11,0	8,6	12,6
Martonne	69,0	34,1	85,3



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	–	5706	27814	29709	–	143924
bm (kg)	–	3,72	20,24	27,13	–	335,26
hm (m)	–	3,35	6,42	6,51	–	18,07
N (pies/ha)	–	1513	1504	1067	–	763

Provincias muestreadas: 1, 9, 20, 31, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 12.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
71	83,17%	243,5	259,2	1,7465

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
71_Mtn	94,51%	236.0	Martonne	25,2501	-0,0105	1,9871	0,0057	0,000361

Modelo dependiente de densidad y zonificación

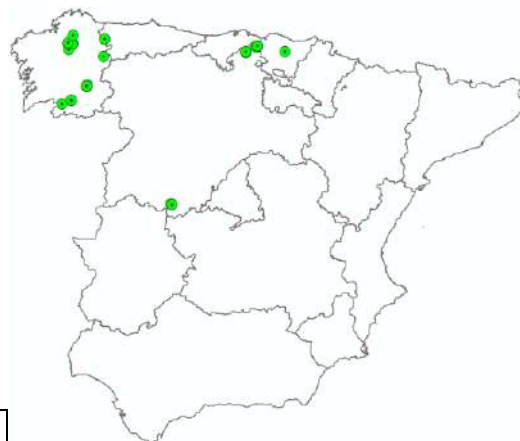
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	71-1	92,81%	237,3	3,7875	0,00954	2,7090	

Betula spp.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	25,5	4,0	52
Densidad (pies/ha)	1270	617	2511
pp_m (mm)	1239	750	1548
Tm (°C)	10,9	8,5	12,3
Martonne	59,3	33,7	72,9



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	230	1799	31937	37898	–	31787
bm (kg)	1,77	17,69	52,80	102,12	–	174,21
hm (m)	2,24	4,24	7,19	8,49	–	7,84
N (pies/ha)	119	112	670	548	–	482

Provincias muestreadas: 5, 9, 27, 32, 33, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 32.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
73	83,12%	639,6	152892	–0,1361	14,3769

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₁	a ₂	b	c
73–pp	81,70%	644,1	pp_m	65,0128	34,2223	–0,2554	100,8

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
Única	73–1	84,62%	638,73	75930	48,0671	–0,1962	39,4068

Eucalyptus globulus Labill.

Rangos muestrados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	9,7	2	28
Densidad (pies/ha)	1111	155	1524
pp_m (mm)	1721	1075	2341
Tm (°C)	13,4	11,3	14,5
Martonne	73,5	44,5	97,6



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	41984	123274	246757	–	108722	55640
bm (kg)	40,07	107,75	230,21	–	602,71	359,44
hm (m)	9,37	16,14	21,15	–	20,11	18,06
N (pies/ha)	1189	1185	1111	–	180	155

Provincias muestradas: 15, 27, 36, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 36.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
61	32,52%	820,1	276814	–0,2884	8,0921

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₁	a ₂	b	c
61–pp	62,67%	800,8	pp_m	120,0	66,3976	–0,7440	414,5

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
Galicia + cornisa cantábrica	61–1	60,94%	802,5	92227,2	137,5	–0,7596	451,3

Eucalyptus nitens H.Deane & Maiden

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	8,6	2	17
Densidad (pies/ha)	1164	201	2686
pp_m (mm)	1582	1036	2358
Tm (°C)	12,0	10,8	13,7
Martonne	71,7	49,7	102,9



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16-20 años
Btot_ha (kg/ha)	51731	132769	184149	38544
bm (kg)	39,86	114,37	208,23	57,49
hm (m)	11,61	16,69	19,49	12,48
N (pies/ha)	1255	1248	1046	670

Provincias muestreadas: 1, 15, 20, 27, 32, 36, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 70.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
64	41,10%	1572,7	196083	-0,3078	4,6913

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₁	a ₂	b	c
64-pp	38,03%	1578,3	pp_m	62,5620	89,6030	-0,2344	33,4336

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
Galicia + cornisa cantábrica	64-1	41,78%	173,9	173018	28,3799	-0,2765	4,1548

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	22,2	7	42
Densidad (pies/ha)	694	118	1512
pp_m (mm)	1370	1071	1791
Tm (°C)	11,1	10,2	12,5
Martonne	64,9	52,1	80,0



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	–	4565	63422	66324	108255	145507
bm (kg)	–	3,31	49,74	124,87	250,91	337,52
hm (m)	–	2,92	9,76	13,56	18,69	21,66
N (pies/ha)	–	1294	1291	551	471	492

Provincias muestreadas: 1, 20, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 20.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
34	65,83	427,9	338951	–0,0383	2,3524

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₁	a ₂	b	c
34–pp	91,81%	401,3	pp_m	239,0	42,9048	–0,1310	11,2972

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
Única	34–1	91,72%	401,5	52514,7	239,5	–0,1473	14,6893

Larix spp.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	22,2	7	42
Densidad (pies/ha)	694	118	1512
pp_m (mm)	1370	1071	1791
Tm (°C)	11,1	10,2	12,5
Martonne	64,9	52,1	80,0



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	–	3003	43144	77940	–	155511
bm (kg)	–	3,39	30,22	104,95	–	125,17
hm (m)	–	3,38	8,55	13,94	–	15,24
N (pies/ha)	–	885	1425	760	–	1242

Provincias muestreadas: 20, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 8.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
35	68,71%	169,4	687,8	1,6336

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
35–pp	93,33%	161,0	pp_m	156,6		0,7168	0,000704	0,000300

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	35–1	76,01%	171,3	710,3		1,4223	0,000178

Sequoia spp.

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,6	3	34
Densidad (pies/ha)	922	453	1648
pp_m (mm)	1579	1071	1791
Tm (°C)	11,9	10,6	13,1
Martonne	72,0	52,1	82,0



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	2914	5457	51410	85227	405627	433860
bm (kg)	2,84	4,05	31,71	128,32	567,16	860,81
hm (m)	2,49	3,05	7,13	12,91	23,97	29,70
N (pies/ha)	1010	1346	1512	666	715	520

Provincias muestreadas: 20, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 11.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
Seq	91,16%	244,8	194,5	2,2354

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático: No se ha alcanzado la convergencia en ningún modelo que incluya parámetro climático.

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	Seq-1	92,83%	246,5	18,7046		2,7150	0,000379

Castanea sativa Mill. (plantaciones de castaño orientadas a producir madera)

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	9	2	20
Densidad (pies/ha)	715	400	1942
pp_m (mm)	1257	857	1557
Tm (°C)	11,3	8,6	13,6
Martonne	59,2	36,3	79,2



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16-20 años	21-25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	513	7345	34705	49383	96218	
bm (kg)	1	12	42	53	209	
hm (m)	1,8	4,3	7,0	7,6	11,7	
N (pies/ha)	695	614	864	1000	460	

Provincias muestreadas: 5, 24, 27, 32, 33, 48.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 35.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Especie	Código	R²adj	AIC	a	b
C. sativa	72- m	71,35%	1423,7	112,5	2,2686

Nota: el modelo base se presenta por separado para C. sativa (plantaciones producción madera) y C. hybrida (plantaciones producción fruto).

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R²adj	AIC	x_cl	a₀	a₁	b₀	b₁	b₂
72-pp	85,69%	1371,8	pp_m	9,5388		1,7251	0,00091	0,00037

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R²adj	AIC	a₀	a₁	b₀	b₁
Única	72-1	79,57%	1397,9	3,2767	0,1519	2,2198	

Castanea x hybrida (plantaciones de castaño para fruto)

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	11,1	2	28
Densidad (pies/ha)	199	59	394
pp_m (mm)	1034	706	1587
Tm (°C)	12,6	10,3	15,0
Martonne	45,7	33,1	70,2



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16-20 años	21-25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	335	2792	10035	14105	–	22458
bm (kg)	3	15	57	83	–	227
hm (m)	2,2	4,1	6,3	6,6	–	8,2
N (pies/ha)	186	194	224	212	–	103

Provincias muestreadas: 10, 15, 27, 28, 32, 49.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 35.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Especie	Código	R ² adj	AIC	a	b
C. hybrida	72 – f	71,35%	1423,7	112,5	1,1695

Nota: el modelo base se presenta por separado para *C. sativa* (plantaciones producción madera) y *C x hybrida* (plantaciones producción fruto).

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
72–pp	85,69%	1371,8	pp_m	9,5388		1,7251	0,00091	0,00037

Modelo dependiente de densidad y zonificación

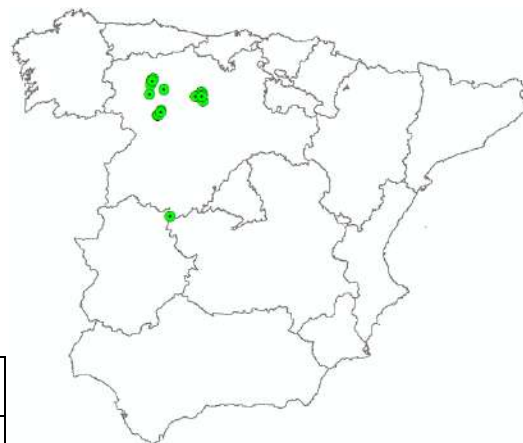
$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Zona validez geográfica	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	72–1	79,57%	1397,9	3,2767	0,1519	2,2198	

Populus x deltoides

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	5,0	1,0	11,0
Densidad (pies/ha)	284	250	400
pp_m (mm)	517	443	935
Tm (°C)	11,4	10,0	15,3
Martonne	24,1	20,5	36,9



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	2747	51512	165555	—	—	—
bm (kg)	9,91	185,29	595,52	—	—	—
hm (m)	6,30	18,15	29,74	—	—	—
N (pies/ha)	287	278	278	—	—	—

Provincias muestreadas: 5, 24, 34, 49.

Número observaciones utilizadas en el ajuste: 16.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
258	85,06%	318,0	5,2183	4,2424

Nota: modelo válido para choperas plantadas a raíz profunda en el valle del Duero.

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático: No se ha alcanzado la convergencia en ningún modelo que incluya densidad parámetro climático.

Modelo dependiente de densidad y zonificación: No se ha alcanzado la convergencia en ningún modelo que incluya densidad y zonificación.

8. Resultados (II): modelos desarrollados para grupos de especies

Al igual que para las especies individuales se ha procedido a realizar el ajuste de los modelos de las ecuaciones 1–8 a cada una de las seis tipologías o grupos de especies definidas anteriormente. En este caso ha sido posible ajustar modelos dependientes de la densidad de la repoblación y de un parámetro climático medio para todos los grupos, excepto para las frondosas caducifolias mediterráneas. La posible razón es que muchas de estas repoblaciones (p.ej. fresnos o almeces, dependen de la disponibilidad de agua en el freático, aspecto no recogido en las variables climáticas).

No se presentan modelos regionalizados, porque la localización geográfica entra de forma explícita en la definición de la tipología. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los mejores modelos seleccionados para cada tipología.

Tabla 3. Resumen de los modelos ajustados para tipologías de grupo de especie (Modelo: modelo base seleccionado; X_Cl: variable climática de tipo medio usado).

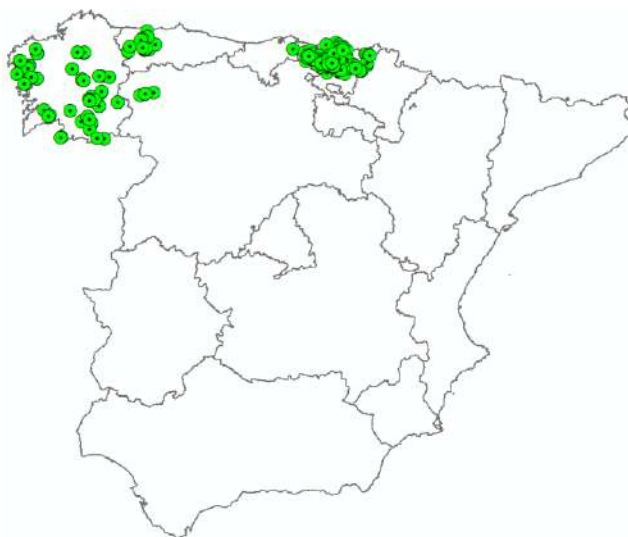
Tipología	Modelo	X_Cl	Validez geográfica
<i>Coníferas productivas del medio Atlántico</i>	Richards	pp_m	ATL
<i>Coníferas de montaña</i>	Alométrica	tm	Zonas de montaña
<i>Coníferas mediterráneas</i>	Richards	Martonne	MN, CLEV, AR
<i>Frondosas caducifolias medio Atlántico</i>	Richards	tm	ATL
<i>Frondosas caducifolias medio Mediterráneo</i>	Alométrica	–	OCC, MN, CLEV, AR
<i>Frondosas perennifolias medio Mediterráneo</i>	Alométrica	tm + pp_m	OCC, MN, CLEV, AR

A continuación, se presentan las fichas con los modelos ajustados para cada una de las seis tipologías de grupo de especie, así como los rangos de edades, densidades y características climáticas muestreadas. Los modelos ajustados para estas tipologías pueden ser útiles tanto para realizar estimaciones en el caso de especies que no dispongan de un modelo individual, como para aquellas especies que sí dispongan de modelo, pero sus condiciones ambientales o de plantación se sitúen fuera del rango muestreado para esa especie.

Coníferas productivas medio atlántico

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	19,5	1	54
Densidad (pies/ha)	817	56	3133
pp_m (mm)	1350	573	2548
Tm (°C)	12,0	9,5	14,6
Martonne	61,4	26,7	113,5



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11– 15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	2191	19885	88183	114552	121466	130016
bm (kg)	2,4	20,9	83,0	133,5	220,0	375,3
hm (m)	1,8	5,3	10,7	14,3	18,2	21,6
N (pies/ha)	876	1118	1222	1035	698	426

Especies utilizadas: plantaciones de coníferas productivas (*Pinus radiata*, *Pinus pinaster* Atl., *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Sequoia*, *Pseudotsuga*, *Larix*, *Chamaecyparis*, *Cryptomeria*, ...) en el medio atlántico.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R²adj	AIC	a	b	c
CONIF_ATL	36,66%	7133,2	136100	-0,1971	7,3583

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R²adj	AIC	x_cl	a₁	a₂	b	c
CONIF_ATL_pp	56,83%	7010,6	pp_m	160,5	80,0833	-0,0846	3,6023

Modelo dependiente únicamente de densidad

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Región de validez	Código	R²adj	AIC	a₀	a₁	b	c
ATL	CONIF_ATL-1	56,83%	7018,8	252351	386,8	-0,0257	1,8179

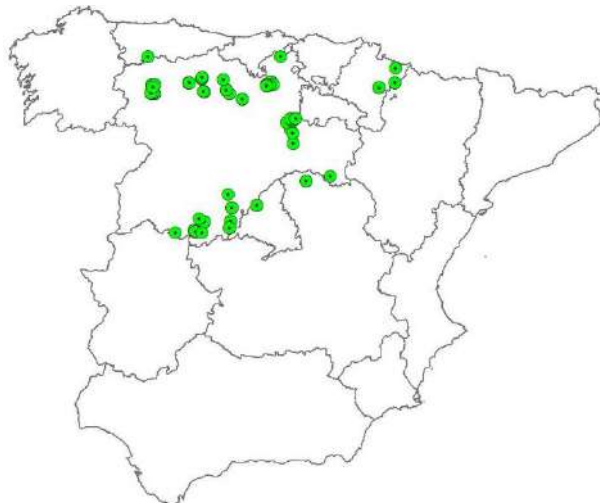
Región de validez: región atlántica

Especies a las que puede aplicarse: coníferas productivas que no disponen de modelo propio (*Chamaecyparis lawsoniana*, *Cryptomeria japonica*, *Tsuga sp.*, *Pinus taeda*).

Coníferas de montaña

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	19,0	3	38
Densidad (pies/ha)	1345	380	2900
pp_m (mm)	737	409	1466
Tm (°C)	9,8	5,7	12,5
Martonne	37,5	18,8	93,1



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	267	2353	22424	44559	48588	94007
bm (kg)	0,2	1,7	13,4	31,7	34,3	91,4
hm (m)	0,5	1,3	3,6	5,8	6,3	10,4
N (pies/ha)	1175	1337	1615	1333	1417	1034

Especies utilizadas: Repoblaciones de *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris* fuera del medio atlántico.

Modelo base

$$Btot_ha = a. edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
CONIF_MONT	43,86%	2303,9	355,0	1,6023

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
CONIF_MONT_tm	72,17%	2230,6	tm	25,3430		1,1230	0,0953	0,000297

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N]. edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Región de validez	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	CONIF_MONT_1	65,02%	2255,8	81,7756		1,7728	0,000231

Región de validez: macizos montañosos, altura superior a 1000 m, temperatura media inferior a 11 °C.

Especies a las que puede aplicarse: *Pinus uncinata*, *Abies alba*.

Coníferas mediterráneas

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	16,0	1	35
Densidad (pies/ha)	876	178	2375
pp_m (mm)	452	265	770
Tm (°C)	13,1	9,4	17,9
Martonne	19,7	10,2	38,2



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6–10 años	11–15 años	16 – 20 años	21 – 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	1657	3965	17316	27326	36636	47467
bm (kg)	1,8	4,9	21,9	32,1	47,2	69,9
hm (m)	0,9	1,3	3,3	4,1	5,3	6,5
N (pies/ha)	795	1002	822	998	875	727

Especies muestreadas: repoblaciones de *Pinus pinea* y *Pinus halepensis* en el medio mediterráneo y árido.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	a	b	c
CONIF_MED	46,55%	4491,5	61239,4	-0,0868	3,3730

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x_cl	a ₁	a ₂	b	c
CONIF_MED_mtn	56,21%	4446,9	Martonne	39,1456	2287,9	-0,0645	1,8667

Modelo dependiente únicamente de densidad

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Región de validez	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b	c
ATL	CONIF_MED-1	55,49%	4450,7	51858,9	51,9778	-0,0502	2,4814

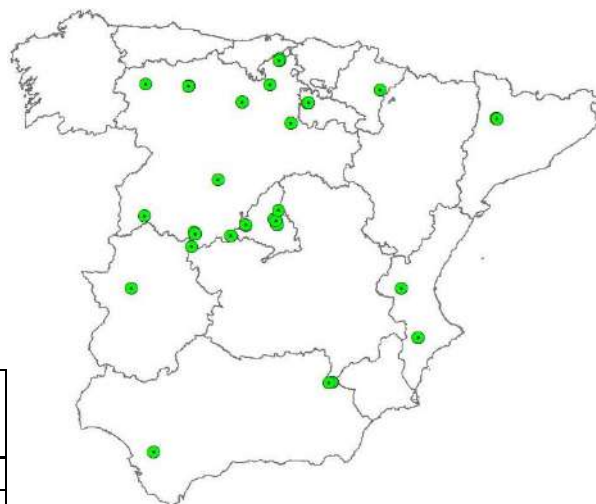
Región de validez: región mediterránea y árida.

Especies a las que puede aplicarse: repoblaciones con *Cedrus* sp, *Cupressus*, *Tetraclinis* y otras coníferas en medios mediterráneos y áridos.

Frondosas caducifolias medio mediterráneo

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	14,1	4	29
Densidad (pies/ha)	708	28	2650
pp_m (mm)	635	386	1164
Tm (°C)	12,1	8,5	16,6
Martonne	29,5	15,9	63,0



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	30	606	15376	10677	11690	–
bm (kg)	0,1	6,3	29,2	28,8	53,7	–
hm (m)	0,7	2,2	4,7	4,6	5,6	2,3
N (pies/ha)	627	455	897	532	183	323

Especies utilizadas: *Betula sp.*, *Celtis australis*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus angustifolia*, *Juglans regia*, *Prunus avium*, *Quercus petraea*.

Modelo base

$$Btot_ha = a.edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
F-CAD-MED	6,77%	947,9	157,3	1,5512

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

No se ha identificado ningún modelo dependiente de la densidad y de parámetro climático.

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N].edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Región de validez	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	F-CAD-MED- 1	18,06%	945,3	81,1826	0,0696	1,6130	

Región de validez: Ámbito mediterráneo

Especies a las que puede aplicarse: Frondosas caducifolias típicas del medio mediterráneo que no disponen de modelo propio (*Celtis sp.*, *Prunus avium*, *Juglans sp.*, *Ulmus*).

Frondosas caducifolias medio atlántico

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	21,0	4	94
Densidad (pies/ha)	1243	233	2511
pp_m (mm)	1314	750	1843
Tm (°C)	11,3	8,6	14,3
Martonne	61,9	33,7	85,3



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>2 años
Btot_ha (kg/ha)	344	3769	15297	50445	113870	135675
bm (kg)	0,3	3,2	13,6	36,6	74,8	148,0
hm (m)	2,1	3,0	5,6	8,0	12,9	15,6
N (pies/ha)	1040	1350	1160	1360	1521	1157

Especies muestreadas: repoblaciones de *Quercus robur*, *Quercus petraea*, *Quercus rubra*, *Fagus sylvatica*, *Prunus avium*, *Betula spp.* en el medio atlántico.

Modelo base

$$Btot_{ha} = [a]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R²adj	AIC	a	b	c
F_CAD_ATL	80,37%	1164,2	155695	-0,1336	13,4073

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_{ha} = [a_1N + a_2x_{cl}]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Código	R²adj	AIC	x_cl	a₁	a₂	b	c
F_CAD_ATL_tm	83,50%	1156,3	tm	44,3096	8804,1	-0,11372	14,0810

Modelo dependiente únicamente de densidad

$$Btot_{ha} = [a_0 + a_1N]. [1 - \exp^{(b \cdot edad)}]^c$$

Región de validez	Código	R²adj	AIC	a₀	a₁	b	c
ATL	F_CAD_ATL-1	82,36%	1160,1	96302,1	46,1334	-0,1349	13,4435

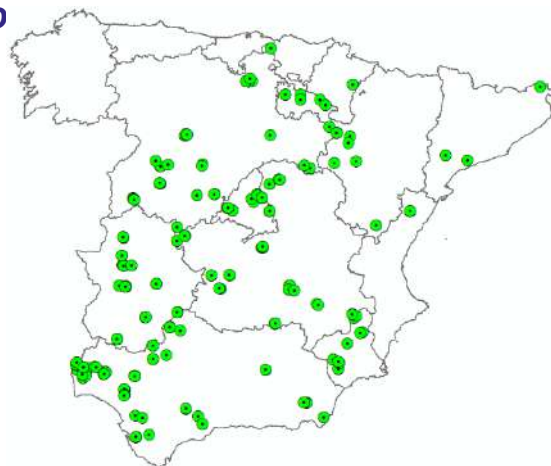
Región de validez: región atlántica.

Especies a las que puede aplicarse: repoblaciones con frondosas caducifolias en el medio atlántico que no disponen de modelo propio (*Quercus rubra*, *Prunus avium*...).

Frondosas perennifolias medio mediterráneo

Rangos muestreados

Variable	Medio	Min	Máx
Edad (años)	15,1	1	31
Densidad (pies/ha)	629	28	5384
pp_m (mm)	541	248	1354
Tm (°C)	14,8	8,7	18,6
Martonne	22,1	8,8	63,9



Valores observados por clases de edad

Variable	<5 años	6-10 años	11- 15 años	16 - 20 años	21 - 25 años	>25 años
Btot_ha (kg/ha)	84	893	7683	11217	28466	18489
bm (kg)	0,3	1,7	12,5	36,6	74,8	148,0
hm (m)	2,1	2,8	5,5	8,0	12,9	15,6
N (pies/ha)	1040	1644	1182	1360	1521	1157

Especies utilizadas: repoblaciones de *Q. ilex*, *Q. suber*, *O. europea* y *C. siliqua* en el medio mediterráneo y el medio árido.

Modelo base

$$Btot_ha = a \cdot edad^b$$

Código	R ² adj	AIC	a	b
F-PER-MED	13,71%	6448,8	46,9806	1,9218

Modelo dependiente de densidad y parámetro climático

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 x_{cl_2} + b_3 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl1}	x _{cl2}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
F-PER-MED-tm-pp	45,7%	6299,3	tm	pp_m	-2,4363	0,0205	0,8888	0,0818	0,000684	-

Modelo dependiente de densidad y zonificación

$$Btot_ha = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 N]}$$

Región de validez	Código	R ² adj	AIC	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁
Única	F-PER-MED	22,88%	6415,6	8,8606	0,0184	2,2187	-

Región de validez: Ámbito mediterráneo y medio árido.

Especies a las que puede aplicarse: Frondosas perennifolias típicas del medio mediterráneo y del medio árido que no disponen de modelo propio (*Q. coccifera*, *A. unedo*...).

9. Estimación de biomasa subterránea

Para la estimación de la biomasa subterránea se han aplicado valores de la razón biomasa de raíz/biomasa aérea (root:shoot ratio), tabuladas para cada especie individual o calculadas por grupos de especies o mezclas de manera similar a lo indicado en el apartado anterior. Los valores propuestos se dan en la Tabla 4. Los valores se han obtenido de Ruiz–Peinado et al. (2011) y Ruiz–Peinado et al. (2012), excepto para *Eucalyptus* sp. (tomado de Herrero et al., 2014) y *Castanea* (tomado de Menéndez–Miguélez et al., 2023)

Tabla 4. Valores de la razón biomasa de raíz – biomasa aérea, por especies, grupos de especies o tipo de mezcla.

Especie	Root:Shoot ratio	Grupo de especie	Root:Shoot ratio
<i>Pinus sylvestris</i>	0,279	Frondosas caducifolias	0,449
<i>Pinus pinea</i>	0,243	Frondosas perennifolias ámbito mediterráneo	0,313
<i>Pinus halepensis</i>	0,229	Coníferas mediterráneas	0,252
<i>Pinus nigra</i>	0,240	Frondosas marcescentes	0,355
<i>Pinus pinaster</i> Mes.	0,285	Coníferas de montaña	0,268
<i>Pinus pinaster</i> Atl.	0,285	Coníferas productivas zona atlántica	0,265
<i>Pinus radiata</i>	0,265		
<i>Juniperus</i> sp	0,343		
<i>Q. robur+petraea</i>	0,466		
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,353		
<i>Quercus faginea</i>	0,357		
<i>Quercus ilex</i>	0,323		
<i>Quercus suber</i>	0,323		
<i>Fraxinus</i> sp.	0,504		
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,200		
<i>Eucalyptus nitens</i>	0,200		
<i>Olea europea</i>	0,303		
<i>Ceratonia siliqua</i>	0,313		
<i>Fagus sylvatica</i>	0,163		
<i>Castanea</i> sp.	**		
<i>Betula</i> sp.	0,466		
<i>Juglans</i> sp.	0,313		
<i>Populus x hybrid</i>	0,363		

** para *Castanea* sp. no hay un valor fijo de root:shoot ratio, sino que está modelizado en función de la edad de la plantación (T, años), de acuerdo al modelo:

$$R/S \text{ ratio} = 3,1052 (T^{-0,7437})$$

10. Ejemplos de uso para la estimación *ex ante* de biomasa fijada por un proyecto de repoblación del que se conoce la localización exacta y la densidad de plantación

En este caso el objetivo es la estimación *ex ante* (antes de realizar la plantación) de la capacidad de fijación de biomasa y absorción de C atmosférico por un proyecto de repoblación determinado, del que se conoce en detalle:

- Localización exacta.
- Especie o especies a emplear.
- Densidad de plantación (pies/ha de todas las especies) a la edad a la que se quiere realizar la estimación.
- Porcentaje de representación de cada especie (en el caso de repoblaciones mixtas).
- Edad a la que se quiere realizar la estimación.

Caso 1. Repoblación pura

El caso más sencillo es el de una repoblación pura con una especie modelizada, en la que disponemos de modelos dependientes de la densidad y un parámetro climático, o dependiente de la densidad y zonificación geográfica (24 especies). Al conocer la localización exacta será posible asignar bien la zona geográfica, bien la precipitación media anual, temperatura media anual o índice de Martonne correspondiente a ese punto de estudio, de acuerdo a los modelos de celda de la AEMET.

Asimismo, se conocerá la densidad de la plantación correspondiente al momento en el que se quieran hacer las simulaciones. En ese sentido, si se quiere realizar una estimación del C fijado por la repoblación a un horizonte temporal de 25 años, el valor de densidad a introducir en el modelo no debe ser el del momento de plantación, sino la esperada en ese momento, teniendo en cuenta tanto posibles marras, pérdidas por mortalidad natural como las intervenciones selvícolas programadas.

Una vez conocida la localización geográfica, valores climáticos medios y densidad de la repoblación en el momento, se buscará la ecuación en la ficha de la especie correspondiente. Si se dispone de ecuación dependiente de parámetro climático y densidad, y tanto los valores de densidad de la repoblación en el momento de la simulación como los de los valores climáticos entran en el rango de los datos usados en el ajuste (ver tablas en la ficha) se priorizará esta ecuación (incluso aunque el valor de R^2 sea inferior). En el caso de que los valores climáticos para el punto de simulación difieran mucho del rango de los parámetros climático usados en el ajuste, se podrá dar preferencia a los modelos dependientes de la zona geográfica y la densidad. Otra alternativa sería utilizar el modelo para la tipología a la que corresponda la especie. En el caso de tratarse de una especie no modelizada se recurrirá bien a los modelos por tipología de especie, bien a asimilarla a una especie que pueda considerarse cercana.

Una vez seleccionado el modelo se podrán realizar proyecciones de biomasa fijada y capacidad de absorción de C atmosférico por 1 hectárea repoblada, en los horizontes temporales propuestos. Para conocer el total de la plantación se multiplican estos valores por la superficie total de la plantación.

Ejemplo:

Se ha realizado una repoblación con *Pinus halepensis* en Calatayud (Zaragoza), con un marco de plantación de 3 x 3 (1111 pies/ha). Se quiere conocer la biomasa fijada: (1) a los 20 años de edad, asumiendo que la mortalidad natural y marras habrá hecho disminuir la densidad hasta los 1000 pies/ha a los 20 años, y (2) a la edad de 35 años, asumiendo que tras realizar una clara la densidad en ese momento será de 600 pies/ha. La precipitación media anual en el punto de plantación es de 391 mm, la temperatura media anual 12,5 °C y el índice de Martonne 17,4.

Iríamos a la ficha correspondiente a *Pinus halepensis*, y tras comprobar el valor de densidad en el momento de simulación y parámetros climáticos se sitúan en el rango de los datos de ajuste, procederíamos a aplicar el modelo dependiente de densidad y parámetro climático (código 24_pp), qué es

$$B_{tot_{ha}} = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl} + b_2 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂
24_pp	55,16%	2420,6	pp_m	730,9	-0,3265	0,8264	0,000334	0,000492

Sustituyendo en la ecuación anterior los valores de densidad, edad y precipitación media, nos daría una estimación de biomasa aérea fijada a los 20 años (con 1000 pies/ha) de **31045 kg M.S. ha⁻¹**, y a los 35 años (con 600 pies/ha) una estimación de **45901 kg M.S. ha⁻¹**. En el caso de querer dar estimaciones de biomasa total (aérea + subterránea) usaríamos el valor de la razón biomasa de raíz/biomasa aérea de la Tabla 4 (0,229), lo que conllevaría multiplicar los valores de biomasa aérea por 1,229 para tener la estimación de la biomasa total.

Caso 2. Repoblación mixta

En el caso de plantaciones mixtas se parte de la densidad total (incluyendo todas las especies) de la plantación (N, pies/ha) en el momento de simulación, y se utiliza ese valor para calcular la biomasa fijada por una hectárea pura teórica de cada una de las especies en las condiciones dadas de localización, densidad y clima. La selección del modelo para cada una de las especies se hará con el mismo criterio que en el caso de las repoblaciones puras, priorizando los modelos que tengan sensibilidad a variables de tipo climático y densidad, siempre que los valores del punto de estudio se encuentren dentro del rango de datos empleado en el ajuste. Una vez realizado este cálculo, se calcula la biomasa fijada y capacidad de absorción por una hectárea real de la plantación, multiplicando el valor teórico correspondiente a 1 hectárea de cada especie por la proporción (en número de pies por ha) de esa especie en la plantación. Por último, se multiplica el valor obtenido por la superficie de la plantación.

Ejemplo:

Se va a realizar una repoblación mixta de *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*, con una densidad de plantación de 1000 pies/ha y un porcentaje de representación del 75% de pino y 25% de *Quercus*, y queremos calcular la biomasa fijada por la repoblación a los 30 años de edad, asumiendo que a esa edad tras pérdidas por marras, habrá una densidad de 800 pies/ha, con un 60% de representación del pino y un 40% de la encina. La repoblación se sitúa en la provincia de Guadalajara, con una precipitación media anual de 600 mm y temperatura media anual 11,5 °C.

En un primer momento buscamos las Tablas para las dos especies. Tras comprobar que los valores de los parámetros climáticos, densidad y edad de simulación entran dentro de los rangos de ajuste, seleccionamos los modelos dependientes de densidad y parámetro climático:

Quercus ilex

$$B_{tot_ha} = [a_0 + a_1 N] \cdot edad^{[b_0 + b_1 x_{cl1} + b_2 x_{cl2} + b_3 N]}$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl1}	x _{cl2}	a ₀	a ₁	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
45_Xcl	43,40%	3739,2	pp_m	tm	1,2437		1,4275	0,000725	0,0667	0,000433

Pinus pinaster Mes.

$$B_{tot_ha} = [a_1 N + a_2 x_{cl}] \cdot [1 - \exp(b \cdot edad)]^c$$

Código	R ² adj	AIC	x _{cl}	a ₁	a ₂	b	c
26_pp	65,51	1541,0	pp_m	91,3993	68,6561	-0,0697	3,9530

En una segunda fase procedemos a calcular la biomasa estimada por cada una de las dos especies en una hectárea teórica, con una densidad de plantación de 800 pies/ha, obteniendo una biomasa fijada estimada por una ha de *Quercus ilex* de **30942 kg M.S. ha⁻¹**, y por una ha de *Pinus pinaster* Mes. de **67869 kg M.S. ha⁻¹**. Para calcular la fijación real en una ha de nuestra repoblación multiplicamos el valor de cada especie por el porcentaje de representación en la plantación:

$$Quercus\ ilex: 30942 \cdot 0,4 = \mathbf{12377\ kg\ M.S.\ ha^{-1}}$$

$$Pinus\ pinaster: 67869 \cdot 0,6 = \mathbf{40721\ kg\ M.S.\ ha^{-1}}$$

La cantidad total de biomasa fijada por la parte aérea de la repoblación será entonces la suma de ambos valores: 40721 + 12377 = **53100 kg M.S. ha⁻¹**. En el caso de querer dar una estimación de la biomasa total se puede calcular la biomasa de raíz de cada una de las especies a partir de los valores de la Tabla 4.

11. Recomendaciones de uso

Se presentan a continuación, a modo de consideración final, una serie de recomendaciones de uso de los modelos presentados:

- Es fundamental considerar los rangos de edad muestreados en el ajuste de los modelos, y evitar realizar estimaciones fuera del rango de edad máximo. Esto es especialmente relevante para aquellos modelos que tienen como base la ecuación de tipo alométrico. El carácter potencial de esta ecuación puede provocar que al realizar estimaciones a edades muy por encima de la máxima edad considerada en el ajuste de lugar a sobreestimaciones severas. En ese sentido, se recomienda no realizar estimaciones para edades superiores en **+ 5 años** a la máxima edad muestreada.
- Una alternativa en el caso de tener que realizar estimaciones fuera del rango de edades es utilizar un modelo para la tipología de grupo de especies, en el que sí

este comprendido ese rango. Una segunda opción es asumir que la tasa de crecimiento estimada en, p.ej., los últimos 5 años del rango sí observado se mantiene constante para la extrapolación. En el ejemplo anterior, si quisiéramos dar una estimación para la encina a los 35 años de edad (rango máximo muestreado 31 años de edad), podríamos calcular p.ej. la biomasa fijada a los 25 años ($17985 \text{ kg M.S. ha}^{-1}$) y a los 30 ($30942 \text{ kg M.S. ha}^{-1}$), calcular la tasa de crecimiento anual para esos 5 años ($2591 \text{ kg M.S. ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y aplicar esta tasa hasta los 35 años.

- c) Se priorizará el uso de los modelos dependientes de una variable climática frente a los modelos de zonificación geográfica, incluso aunque el coeficiente de determinación R^2 sea superior. Sin embargo, esto se hará únicamente en el caso de que el valor de las variables climáticas en el punto de estimación esté dentro de los rangos muestreados en el ajuste de los modelos para esa especie. En caso de desviaciones muy severas se utilizarán modelos con base en la zonificación geográfica
- d) No es recomendable realizar estimaciones para plantaciones con densidades más allá del rango superior e inferior muestreado. Para repoblaciones con más de una especie es importante recordar que la densidad a utilizar es la de toda la repoblación (no solo la de la especie), puesto que los modelos se refieren a una hectárea teórica de esa especie. En caso de desviaciones muy severas pueden proporcionarse los valores dados por el modelo base
- e) Es importante recordar que, a la hora de realizar las estimaciones, la densidad de la repoblación se refiere a la esperada en el horizonte temporal para la que se realiza la estimación, teniendo en cuenta entonces posibles mermas de la densidad inicial de establecimiento debido a marras de la plantación, mortalidad natural o intervenciones selvícolas (clareos y/o claras).
- f) En relación con lo anterior, a la hora de realizar estimaciones en horizontes temporales amplios, es importante utilizar normas de silvicultura que definan la evolución en la densidad que va a tener la repoblación, e incluso la corta final y sustitución de la masa, si corresponde.
- g) Para alguna de las especies el muestreo se ha realizado en una única región (p.ej. *Eucalyptus nitens*, que únicamente se ha muestreado en la cornisa cantábrica). En general, no se recomienda el uso de los modelos fuera de las áreas donde se ha muestreado, incluso aunque las condiciones ambientales sean similares. En cualquier caso, consultar siempre en el mapa de la ficha las regiones donde se ha muestreado repoblaciones de la especie.
- h) Todos los modelos desarrollados permiten dar estimaciones de biomasa fijada ($\text{kg M.S. ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En el caso de querer transformar a CO_2 atmosférico capturado se recomienda emplear los valores tabulados recogidos en la bibliografía (p.ej. Montero et al. 2005).
- i) Los modelos presentados no constituyen herramientas para elegir la especie a usar en las repoblaciones, decisión que debe apoyarse en criterios técnicos.

12. Bibliografía

- CALAMA, R; RUÍZ-FERNANDEZ, F; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M; MADRIGAL, G; GARCÍA-CALAMA, T; y PARDOS, M. 2022. Nuevos modelos para estimación de biomasa y CO₂ fijado en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Galicia. Actas del 8º CFE. Disponible online: <https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-1114.pdf>
- CHAZDON, R; y BRANCALION P. 2019. Restoring forests as a means to many ends. *Science*, 364, 24–25. <https://doi.org/10.1126/science.aax9539>
- GONZÁLEZ-GAARSLEV, D.; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; MADRIGAL, G; GARCÍA, M.; PARDOS, M.; DORRONSORO, B.; OMAÑAS, J.M.; CANTERO, A.; y CALAMA, R. 2025. Herramientas para la estimación de la biomasa en plantaciones de coníferas productivas en el País Vasco. Actas 9º Congreso Forestal Español. Comunicación 9CFE–1587.
- GRISCOM, BW; ADAMS, J; ELLIS, PW; et al. 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.
- HERRERO, C; JUEZ, L; TEJEDOR, C; PANDO, V; y BRAVO, F. 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and Bioenergy*, 67, 212–222.
- KIVISTE, A; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G; ROJO, A; y RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografías INIA Forestal nº 4. INIA, Madrid 190 pp.
- MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P; PARDOS, M; MADRIGAL, G; RUIZ-PEINADO, R; LÓPEZ-SENEPLEDA, E; DEL RÍO, M; y CALAMA R. 2023. Development of tools to estimate the contribution of young sweet chestnut plantations to climate-change mitigation. *Forest Ecology and Management*, 530, 120761. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120761>.
- MENENDEZ-MIGUELEZ, M; CALAMA, R; DEL RÍO, M; MADRIGAL, G; LÓPEZ-SENEPLEDA, E; PARDOS, M; y RUIZ-PEINADO, R. 2022. Species-specific and generalized biomass models for estimating carbon stocks of young reforestation. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106453. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106453>
- MENÉNDEZ-MIGUELEZ, M; RUIZ-PEINADO, R; DEL RÍO, M; y CALAMA, R. 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal Forest Research*, 140(12).
- MONTERO, G; RUIZ-PEINADO, R; y MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA Forestal nº 14. INIA, Madrid.
- ROBLA, E.; y GONZÁLEZ, A.I. 2018. La importancia de las tierras forestales en el nuevo reglamento LULUCF de la Unión Europea. *Montes*, 134, 10–15
- RUIZ-PEINADO, R; DEL RÍO, M.; y MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20, 176–188.



RUIZ–PEINADO, R; MONTERO, G; y DEL RIO, M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21, 42.

ANEXO (A1). Tabla de precipitación media provincial y asignación de las provincias a las grandes áreas territoriales

CP	Provincia	Región	Precipitación media provincial (mm año ⁻¹)
1	Álava	ATL	896,1
2	Albacete	CLEV	439
3	Alicante	AR	429
4	Almería	AR	323,7
5	Ávila	MN	700,6
6	Badajoz	OCC	538
7	Baleares	CLEV	
8	Barcelona	CLEV	693,4
9	Burgos	MN	657,8
10	Cáceres	OCC	712,1
11	Cádiz	OCC	759,5
12	Castellón	CLEV	596,6
13	Ciudad Real	CLEV	482,5
14	Córdoba	OCC	571,3
15	La Coruña	ATL	1646,3
16	Cuenca	CLEV	538,4
17	Gerona	CLEV	875,4
18	Granada	AR	482,9
19	Guadalajara	CLEV	575,6
20	Guipúzcoa	ATL	1579
21	Huelva	OCC	652,5
22	Huesca	MN	748,8
23	Jaén	CLEV	594,7
24	León	MN	846,1
25	Lérida	CLEV	664,9
26	La Rioja	MN	593,8
27	Lugo	ATL	1221,7
28	Madrid	CLEV	544
29	Málaga	OCC	662,8
30	Murcia	AR	331,4
31	Navarra	MN	949,2
32	Orense	ATL	1201
33	Asturias	ATL	1271
34	Palencia	MN	597,6
35	Las Palmas	CAN	
36	Pontevedra	ATL	1604,3
37	Salamanca	OCC	610,7
38	Santa Cruz de Tenerife	CAN	
39	Cantabria	ATL	1287,2
40	Segovia	MN	529,4
41	Sevilla	OCC	585,2
42	Soria	MN	564,7
43	Tarragona	CLEV	548,4

CP	Provincia	Región	Precipitación media provincial (mm año ⁻¹)
44	Teruel	MN	477,9
45	Toledo	CLEV	479,2
46	Valencia	CLEV	532,5
47	Valladolid	MN	438,8
48	Vizcaya	ATL	1385
49	Zamora	MN	604,8
50	Zaragoza	MN	429,6

ANEXO (A2). Listado de abreviaturas y unidades

Btot_ha	Biomasa total por hectárea (parte aérea), expresado en kg de materia seca (M.S) por hectárea .
Bm	Biomasa media de los árboles (parte área), expresada en kg/árbol.
Hm	Altura media de los árboles, expresada en m.
N	Densidad de la repoblación (pies por hectárea).
	Variable climática a incluir en los modelos, que puede ser:
X_cl	- pp_m: precipitación media anual (mm). - tm: temperatura media anual (°C). - Martonne: índice de Martonne.
Z1	Variable ficticia indicadora de una región (vale 1 si la plantación está en esa región, 0 en el caso contrario)