

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

HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE CARBONO EN EL  
MARCO DE PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE GESTIÓN  
FORESTAL MEJORADA: CONVERSIÓN DE ZONAS DE  
APROVECHAMIENTO A ZONAS DE CONSERVACIÓN

DICIEMBRE DE 2025



El proyecto eco2for cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demo gráfico (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

#### Cómo citar:

Núñez Manso, Y., Ramos, R, del Río, M., López–Senespleda, E., Pardos, M. y Calama, R. 2025. Herramientas de estimación de carbono en el marco de proyectos de absorción de gestión forestal mejorada: conversión de zonas de aprovechamiento a zonas de conservación. Versión 1. ICIFOR, INIA–CSIC. © 2025 by YOEL NÚÑEZ MANSO 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. Marco del proyecto.....                                                  | 4  |
| 2. Objetivo.....                                                            | 4  |
| 3. Estado del arte.....                                                     | 5  |
| 3.1. Modelos de crecimiento .....                                           | 5  |
| 3.2. Densidad de Reineke .....                                              | 6  |
| 3.3. Descripción esquemática de la metodología propuesta .....              | 6  |
| 4. Modelos de crecimiento por especie .....                                 | 8  |
| 4.1. <i>Fagus sylvatica</i> .....                                           | 8  |
| 4.2. <i>Pinus halepensis</i> .....                                          | 13 |
| 4.3. <i>Pinus nigra</i> .....                                               | 18 |
| 4.4. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>atlantica</i> .....                    | 24 |
| 4.5. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>mesogeensis</i> .....                  | 30 |
| 4.6. <i>Pinus pinea</i> .....                                               | 36 |
| 4.7. <i>Pinus radiata</i> .....                                             | 42 |
| 4.8. <i>Pinus sylvestris</i> .....                                          | 47 |
| 4.9. <i>Quercus pyrenaica</i> .....                                         | 52 |
| 4.10. <i>Quercus robur</i> .....                                            | 57 |
| 5. Ejemplo de uso de la aplicación Excel para <i>Pinus sylvestris</i> ..... | 62 |
| 6. Agradecimientos .....                                                    | 68 |
| 7. Referencias.....                                                         | 69 |

## INFORMACIÓN DEL DOCUMENTO

| PROYECTO BF138 – CONVOCATORIA BIOECONOMÍA FORESTAL 2023 |                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título del proyecto</b>                              | Mejora de la contribución del sector forestal a la lucha contra el cambio climático                                      |
| <b>Acrónimo del proyecto</b>                            | eco2for                                                                                                                  |
| <b>Título acción</b>                                    | A2 Elaboración de nuevas herramientas de cálculo de gestión forestal mejorada                                            |
| <b>Título subacción</b>                                 | A.2.1. Desarrollo de Calculadoras de proyectos de absorción de gestión forestal mejorada.                                |
| <b>Duración</b>                                         | M2–M18                                                                                                                   |
| <b>Código resultado</b>                                 | R 2.3                                                                                                                    |
| <b>Nombre del entregable</b>                            | Calculadora de proyectos de absorción de creación de zonas de evolución natural en zonas de aprovechamientos forestales. |
| <b>Entidad coordinadora de la acción</b>                | INIA                                                                                                                     |
| <b>Entidad coordinadora de la subacción</b>             | INIA                                                                                                                     |



## 1. Marco del proyecto

La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) ha sido pionera en el desarrollo de un sistema voluntario de registro de huella de carbono, proyectos de secuestro de carbono y reducción de emisiones a través del “Proyecto Clima” (MITECO, 2021). En el marco del sector forestal se ha despertado un alto interés por la generación de créditos ligados a proyectos de absorción por forestación, reforestación o restauración post incendios. Estos proyectos se fundamentan en la capacidad de fijación de carbono (C) atmosférico por parte de los nuevos bosques y terrenos forestales, generados de manera artificial en antiguos terrenos agrícolas, terrenos forestales yermos o bosques degradados (Bastin et al., 2019). De manera simultánea al auge de estos proyectos, surge la necesidad de desarrollar nuevos proyectos de absorción basados en la modificación de la gestión forestal actualmente aplicada en bosques ya establecidos, al objeto de optimizar la capacidad de fijación de C de los mismos (Ameray et al., 2021). La implementación de estos nuevos proyectos de absorción por gestión forestal mejorada permitirá ampliar y mejorar los sistemas voluntarios de registro de huella de carbono existentes.

En este contexto, el proyecto “Mejora de la contribución del sector forestal a la lucha contra el cambio climático, ECO<sub>2</sub>FOR”, (ECO2FOR, 2024) pretende reforzar la lucha contra el cambio climático mediante el desarrollo de proyectos absorción de carbono y mitigación en el ámbito forestal, atrayendo inversión privada y contribuyendo al desarrollo de actividad económica en el medio rural y lucha contra la despoblación. La segunda acción de este proyecto queda descrita como “Elaboración de nuevas herramientas de cálculo de gestión forestal mejorada (GFM)”. En concreto, se pretende el desarrollo de calculadoras de proyectos de absorción para poder determinar el aumento en los almacenes de C asociados a estos nuevos proyectos. En España, existen numerosos documentos que reflejan la selvicultura estándar propuesta para las distintas especies y formaciones forestales como el Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008). Sin embargo, en la actualidad se han propuesto prácticas de gestión forestal, más allá de la regulación de la espesura, que pueden resultar en un aumento de la capacidad de absorción de los bosques por encima de sus niveles de base.

## 2. Objetivo

En el presente documento, se desarrollará la metodología propuesta para el cálculo de los stocks de carbono asociados a los proyectos de gestión forestal mejorada basados en la **conversión de zonas de aprovechamiento forestal a zonas de conservación**. Esta conversión se produce en sistemas forestales sometidos a un aprovechamiento forestal intensivo o en aquellos con una gestión basada en la aplicación de cortas de mejora y de regeneración natural en los que ahora se propone el establecimiento de rodales de evolución natural, donde se suspenda la intervención, permitiendo el desarrollo de la masa, y obteniendo, a largo plazo, incrementos en las existencias medias de C (ECO2FOR, 2024). Para esta metodología, que permitirá el desarrollo posterior de calculadoras para la estimación del incremento de carbono debido a la implementación de prácticas de GFM, resulta necesario la calibración y adaptación de modelos de

crecimiento actualmente existentes en España (Bravo et al., 2012) que permiten simular el desarrollo y proyección en el tiempo del volumen del rodal bajo una interrupción de prácticas de gestión. En segundo lugar, se ajustará la mortalidad natural del modelo con respecto a la densidad de Reineke. Las salidas de estos modelos dadas en volumen, son posteriormente transformadas a biomasa y finalmente convertidas en absorciones generadas de CO<sub>2</sub> atmosférico.

A lo largo del presente documento, se desarrollarán las metodologías propuestas para el cálculo de los stocks de carbono por la conversión a conservación para diez principales masas forestales de nuestro país.

### **3. Estado del arte**

#### **3.1. Modelos de crecimiento**

Como ya se ha indicado la metodología se basa en la calibración y/o adaptación de modelos de crecimiento existentes en la actualidad en España (modelos estáticos y modelos dinámicos). Los modelos de crecimiento y producción estáticos son sistemas estructurados de relaciones matemáticas, estadísticas y/o lógicas que no dependen, o no tienen en cuenta explícitamente, la tasa de crecimiento de los árboles y/o los rodales forestales (Vanclay et al., 1994). Los modelos estáticos más habitualmente empleados son las tablas de producción. Estas se definen como cuadros numéricos que muestran la evolución en el tiempo de las variables de un rodal forestal coetáneo o regular, de una especie dada, dentro de un ámbito geográfico determinado, para distintas clases de calidad de estación y para uno o diferentes tratamientos selvícolas (Madrigal et al., 1999). La estructura básica del modelo estático que da lugar a las tablas de producción está formada, al menos, por cuatro ecuaciones o funciones de salida, tradicionalmente denominadas relaciones fundamentales. Estas relaciones fundamentales están asociadas a las variables de altura dominante, densidad, diámetro cuadrático y volumen (Diéguez-Aranda et al., 2009).

Por su parte, los modelos dinámicos tienen en cuenta la evolución en el tiempo (es decir, el crecimiento) de las variables descriptivas de los árboles y/o los rodales forestales, por lo que para su construcción es necesario disponer de datos recogidos en árboles o rodales inventariados al menos en dos ocasiones, y además el ajuste estadístico debe de realizarse con una metodología que permita tener en cuenta dicho crecimiento (Diéguez-Aranda et al., 2009). Los modelos de carácter dinámico predicen fundamentalmente tasas de cambio, es decir, el crecimiento de ciertas variables que definen el estado del sistema (por ejemplo, la altura dominante, el área basimétrica y el número de pies por hectárea) bajo condiciones distintas de densidad. La estructura básica de los modelos dinámicos está constituida por variables o funciones de entrada o estado, funciones de transición y funciones de salida.

Una de las condiciones fundamentales para que se puede desarrollar la metodología del presente documento es que los modelos seleccionados cuenten con ecuaciones que predigan la mortalidad natural de la masa. O, en su defecto, sea posible calcular el cambio de densidad en función de la edad o altura de la masa. Esta mortalidad del modelo es la que quedará validada por comparación con la densidad de Reineke.

Sin embargo, muchos de los modelos que pueden aplicarse para las masas forestales desarrolladas en el territorio nacional no cumplen esta condición. En estos casos, la mortalidad natural de la masa será extraída generalmente de la Red de Parcelas Permanentes del ICIFOR (INIA–CSIC), cuyas tasas serán presentadas en este documento.

### 3.2. Densidad de Reineke

Para poder llevar a cabo una modelización que se aproxime a la “no gestión” de las masas y su conversión a zonas de conservación, resulta indispensable simular la competencia y mortalidad por autoaclareo de las masas. Para ello, la densidad es un indicador confiable para la caracterización de los rodales, siendo una de las guías de densidad más frecuentemente utilizadas el índice de densidad de Reineke (Reineke, 1933).

Los recursos necesarios para el crecimiento de los árboles dentro de las masas forestales son limitados. A medida que aumenta el tamaño de los árboles, las necesidades de recursos aumentan y el autoaclareo (mortalidad natural de los árboles inducida por el aumento de la competencia) comienza a ser un proceso activo en la dinámica forestal (Aguirre et al., 2018). El autoaclareo comienza a producirse cuando una masa se aproxima a la densidad máxima, definida esta como el número máximo de árboles de un tamaño dado que pueden crecer por hectárea en una masa (Puettmann et al., 1993; Tang et al., 1994). Así, Reineke (1933) define una relación entre el número máximo de árboles por hectárea y el diámetro medio cuadrático, que puede expresarse como un modelo lineal tras una transformación logarítmica:

$$N_{max} = EXP(C_0 + (E_0) \cdot Ln(Dg)) \quad (Ec. 1),$$

donde  $N_{max}$  es la densidad máxima de árboles por hectárea,  $C_0$  y  $E_0$  son variables específicas de cada especie (Aguirre et al., 2018; Rodríguez de Prado et al., 2020) y  $Dg$  es el diámetro cuadrático en cm.

Adicionalmente, para comparar densidades máximas entre modelos se suelen emplear coeficientes de equivalencia en la competencia, definidos como los *Stand Density Index* (Índice de densidad de la masa; SDI). Se define como SDI al número de árboles de 25 cm por hectárea de espesura equivalente:

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{E_0} \quad (Ec. 2),$$

donde  $N_{max}$  es la densidad máxima de Reineke,  $Dg$  es el diámetro cuadrático en cm y  $E_0$  es una variable específica para cada especie (Aguirre et al., 2018; Rodríguez de Prado et al., 2020).

Para ser conocedores de la capacidad máxima del rodal, se utiliza frecuentemente el  $SDI_{max}$  como medida cuantitativa. Cuando el índice de densidad máxima del rodal se obtiene a partir de los modelos básicos de tamaño máximo –densidad, este adquiere valores constantes para cada especie y en el presente documento quedan extraídos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

### 3.3. Descripción esquemática de la metodología propuesta

La metodología seguida para la modelización de la biomasa de diez principales masas forestales del territorio nacional es la siguiente (Figura 1):

- 1) Búsqueda bibliográfica y selección de modelos dinámicos de crecimiento, extracción de funciones de entrada y de salida y desarrollo de tablas de producción para los diferentes índices de sitio en aras de obtener el volumen total de la masa. En su defecto, selección de modelos estáticos que predigan densidad.
- 2) Comprobación y ajuste en el caso de que fuera necesario de la mortalidad natural propuesta por el modelo seleccionado con respecto a la densidad calculada por Reineke.
- 3) Conversión del volumen total del rodal en biomasa mediante el uso de factores de expansión de la biomasa o la aplicación de un factor de densidad de la madera con un contenido de humedad del 12 % tabulado por especies.
- 4) Conversión de la biomasa en absorciones de CO<sub>2</sub> empleando la metodología propuesta por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI).

A continuación, se procede a explicar de forma detallada la metodología para cada una de las especies.

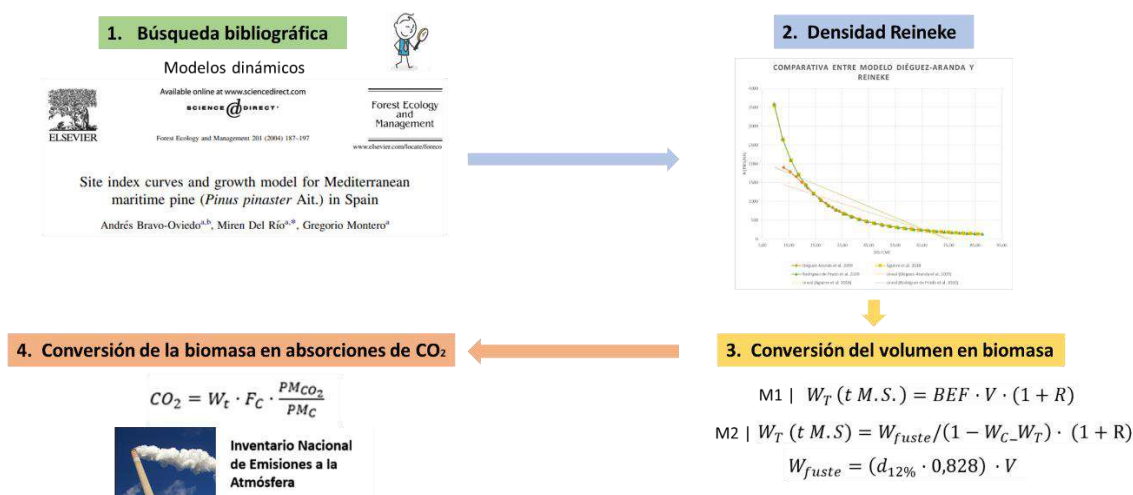


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta.

## 4. Modelos de crecimiento por especie

### 4.1. *Fagus sylvatica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Fagus sylvatica*, únicamente se desarrolla un modelo estático. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Castaño–Santamaría et al. (2022) (Tabla 1). Las relaciones fundamentales del modelo han sido obtenidas a partir de inventario de rodales naturales a lo largo del noroeste de la Cordillera Cantábrica (97 parcelas en Asturias y 15 en León). En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 6, 12, 18 y 24 m.

Tabla 1. Relaciones fundamentales para *Fagus sylvatica*. Fuente: Castaño–Santamaría et al. (2022).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ecuaciones                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Primera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $H_{02} = \frac{23,8753 + X_0}{1 + \left(\frac{20526,03}{X_0}\right) \cdot t_2^{-1,51}}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left( H_{01} - 23,8753 + \sqrt{(H_{01} - 23,8753)^2 + 4 \cdot 20526,03 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,51}} \right)$ |
| Segunda relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $N = 1,00630298 \cdot EXP(11,77927) \cdot H_{02}^{-1,63664}$                                                                                                                                                                       |
| Tercera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $dg = 1,006302985 \cdot EXP(5,632281) \cdot N^{-0,46971} \cdot H_{02}^{0,260024}$                                                                                                                                                  |
| Cuarta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $V = 1,00761799 \cdot G^{1,046832} \cdot H_{02}^{0,644167}$                                                                                                                                                                        |
| Quinta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $Hm = 1,01340619 + H_{02}^{0,895929}$                                                                                                                                                                                              |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia en años, dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m <sup>3</sup> /ha, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha y Hm la altura media en m. |                                                                                                                                                                                                                                    |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones de densidad máxima para *Fagus sylvatica*. Fuente: Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                 | Ecuaciones                                       | Fuente                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                          | $N_{max} = EXP(13,170 + (-1,9471) \cdot Ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020). |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y Dg es al diámetro cuadrático. |                                                  |                                   |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Castaño–Santamaría et al. (2022) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 2).

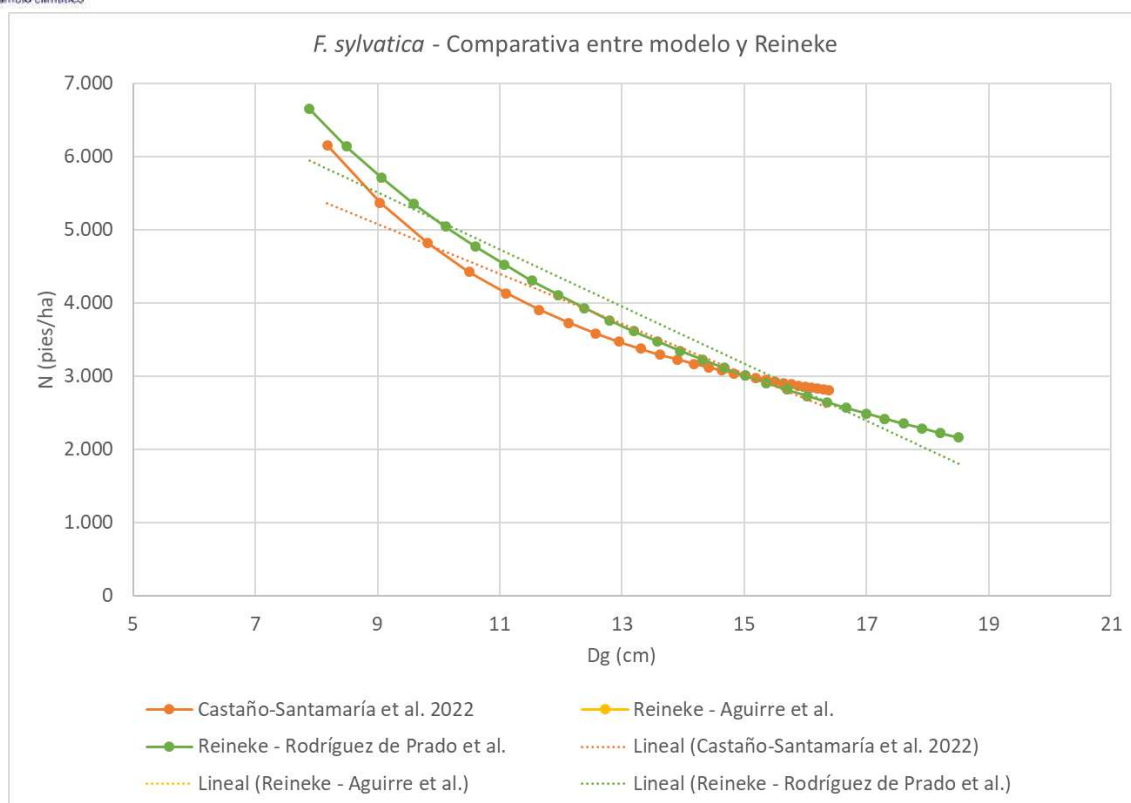


Figura 2. Comparativa del tamaño máximo –densidad entre el modelo de crecimiento de Castaño –Santamaría et al. (2022) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por el modelo de Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 18.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 2, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Castaño –Santamaría et al. (2022) ofrece un valor de densidad similar a su potencial valor máximo. En definitiva, y tras un breve análisis, no parece necesario el ajuste de la densidad de manera visual.

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Rodríguez de Prado et al. (2020) y el diámetro medio cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Castaño –Santamaría et al. (2022):

$$SDI = N_{max} \cdot \left( \frac{Dg}{25} \right)^{1.9471} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Rodríguez de Prado et al. (2020) toma un valor de 995.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 90 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor de  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 995 desde los 90 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de Etzold et al. (2019). Para el caso de *Fagus sylvatica*, estos datos son: 1,3 %.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,9471} \right)^{\frac{1}{1,9471}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 3):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_T$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguel et al. (2021) (Tabla 3) en combinación con Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 3. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                | Fuente                        |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                      | –                             |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                       | –                             |
| Volumen individual       | $V_u = 0,0791122 \cdot Dg^{1,95731} \cdot Hm^{0,75504}$                                                 | Martínez–Millán et al. (1993) |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                 | Menéndez–Miguel et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0657 y $\beta_1$ es 0,9064 |                               |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = 0,2784$                                                                                |                               |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,163$                                                                                             | Ruiz–Peinado et al. (2011)    |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,859$                                                                                             | SEI (2024)                    |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $V$  es el volumen del rodal en  $m^3$  /ha,  $BEF$  es el factor de expansión de biomasa,  $V_u$  es el volumen de árbol individual,  $W_u$  es la biomasa del árbol unitario,  $Dg$  es el diámetro cuadrático,  $Hm$  es la altura media en m,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y  $R$  es la relación raíz–vástago.

- b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–

Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                    | Ecuación                                                           | Fuente                                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total               | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste            | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                       | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,772$                                                 | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_C - W_T = 0,2784$                                               | Menéndez-Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,163$                                                        | Ruíz-Peinado et al. (2011)            |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,859$                                                        | SEI (2024)                            |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $d_{12\%}$  es la densidad al 12 % de humedad,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en  $m^3$  /ha,  $W_C - W_T$  es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

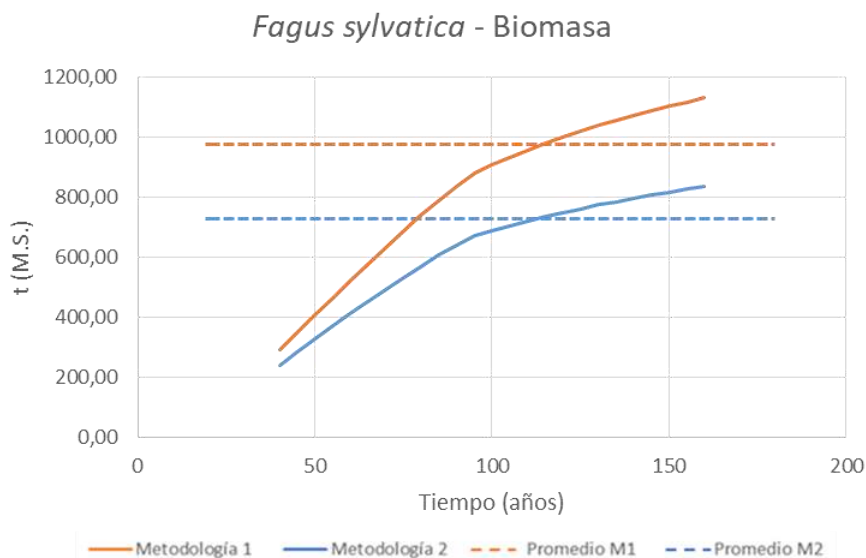


Figura 3. Evolución del volumen de la masa para *Fagus sylvatica* a lo largo del turno propuesto (160 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (48,6 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido.

Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 4; Tabla 5).

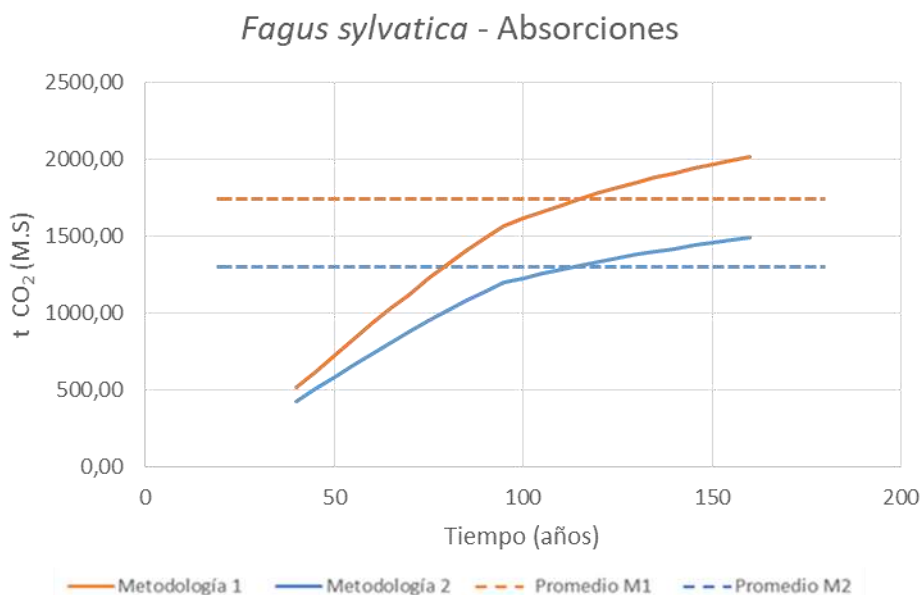


Figura 4. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Fagus sylvatica* a lo largo del turno propuesto (160 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011).

Tabla 5. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Fagus sylvatica* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011).

| Castaño–Santamaría et al. (2022).<br>Modelo estático |                    |                    |
|------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Turno: 160 años                                      | Metodología 1 (M1) | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)                              | 3,80               | 2,13               |
| Biomasa acumulada anual (t)                          | 4,36               | 2,45               |
| Absorción media anual (t)                            | 6,78               | 3,79               |
| Absorción acumulada anual (t)                        | 7,77               | 4,37               |

## 4.2. *Pinus halepensis*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus halepensis*, únicamente se desarrolla un modelo estático. Se ha empleado una modificación de las relaciones fundamentales obtenidas de Montero et al. (2001) (Tabla 6) a partir de una red de experimentación que consta de 72 parcelas distribuidas en las provincias de Albacete, Castellón, Jaén, Murcia, Teruel, Valencia y Zaragoza. En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 14, 17 y 20 m.

Tabla 6. Relaciones fundamentales para *Pinus halepensis*. Fuente: modificado de Montero et al. (2001).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Ecuaciones                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Primera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                             | $H_{02} = H_{01} \cdot \frac{[1 - EXP(-0,0203954 \cdot t_2)]^{\frac{1}{1,046295}}}{[1 - EXP(-0,0203954 \cdot t_1)]^{\frac{1}{1,046295}}}$ |
| Segunda relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                             | $\ln(N) = 9,40793 - 1,16872 \cdot \ln(H_{02})$                                                                                            |
| Tercera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                             | $Dg = -7,30304 + 1,18309 \cdot H_{02} + 3,63489 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}}\right)$                                                  |
| Cuarta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                              | $V = \left(\frac{N}{100}\right) \cdot 0,077186 \cdot Dg^{1,84818} \cdot H_{02}^{0,88012}$                                                 |
| Quinta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                              | $H_m = -0,57881 + 0,910849 \cdot H_{02}$                                                                                                  |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m <sup>3</sup> /ha y Hm la altura media en m. |                                                                                                                                           |

Para el cálculo de la mortalidad se emplea la siguiente ecuación:  $N_n = N_{n-1} - [f(N_{n-1}) - f(N_n)]$ , donde  $N_n$  es la densidad en el tiempo n,  $N_{n-1}$  es la densidad en el momento n-1 y  $f(N)$  es la función de densidad de la especie. Esta ecuación se aplica de forma consecutiva hasta conocer la densidad observada en el momento deseado (tiempo n). Se trata de una aproximación para el cálculo de mortalidad a partir de una densidad inicial establecida (n-1). Una vez definidas las funciones para el modelo estático, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 7).

Tabla 7. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus halepensis*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                 | Ecuaciones                                        | Fuente                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                          | $N_{max} = EXP(12,317 + (-1,8292) \cdot \ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima                                                                          | $N_{max} = EXP(11,982 + (-1,7760) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y Dg es al diámetro cuadrático. |                                                   |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Montero et al. (2001) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 5).

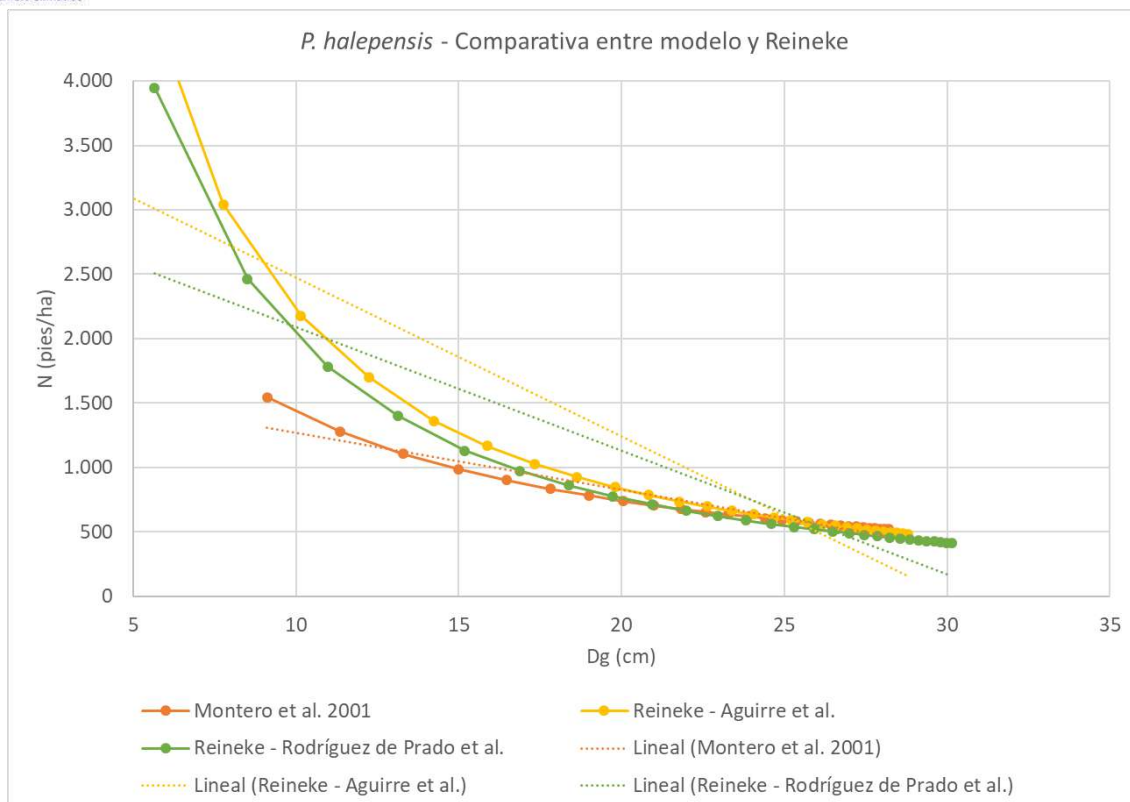


Figura 5. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Montero et al. (2001) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 18.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 5, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Montero et al. (2001) ofrece un valor de densidad similar a su potencial valor máximo. En definitiva, y tras un breve análisis, no resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Montero et al. (2001):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1.8292} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 732.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que el SDI del modelo de crecimiento es menor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento no sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie.

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 526 y un exponente de 1,7760. Arrojando el mismo resultado.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. El siguiente paso es la conversión de

volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 6):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_T$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguel et al. (2021) pero con datos no publicados (Tabla 8) en combinación con Montero et al. (2001) y SEI (2024).

Tabla 8. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Ecuación                                                                                                 | Fuente                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Biomasa total                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                       | –                             |
| Factor expansión biomasa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $BEF = W_u / V_u$                                                                                        | –                             |
| Volumen individual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $V_u = 0,077186 \cdot Dg^{1,84818} \cdot Hm^{0,88012}$                                                   | Montero et al. (2001)         |
| Biomasa árbol unitario                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$                                                                      | Menéndez–Miguel et al. (2021) |
| Biomasa de fuste                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0374 y $\beta_1$ es 0,9192. |                               |
| Relación de copa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $W_{C-W_T} = 0,428$                                                                                      |                               |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $R = 0,229$                                                                                              | Ruiz–Peinado et al. (2011)    |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $R = 0,309$                                                                                              | SEI (2024)                    |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, $Dg$ es el diámetro cuadrático, $Hm$ es la altura media en m, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_{C-W_T}$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz–vástago. |                                                                                                          |                               |

- b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 9).

Tabla 9. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                    | Ecuación                                                           | Fuente                                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total               | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste            | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                       | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,546$                                                 | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_{C-W_T} = 0,428$                                                | Menéndez–Miguel et al. (2021)         |
| Relación raíz–vástago       | $R = 0,229$                                                        | Ruiz–Peinado et al. (2011)            |

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ecuación    | Fuente     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                 | $R = 0,309$ | SEI (2024) |
| donde $W_T$ es la biomasa total, $t$ M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz–vástago. |             |            |

### *Pinus halepensis* - Biomasa

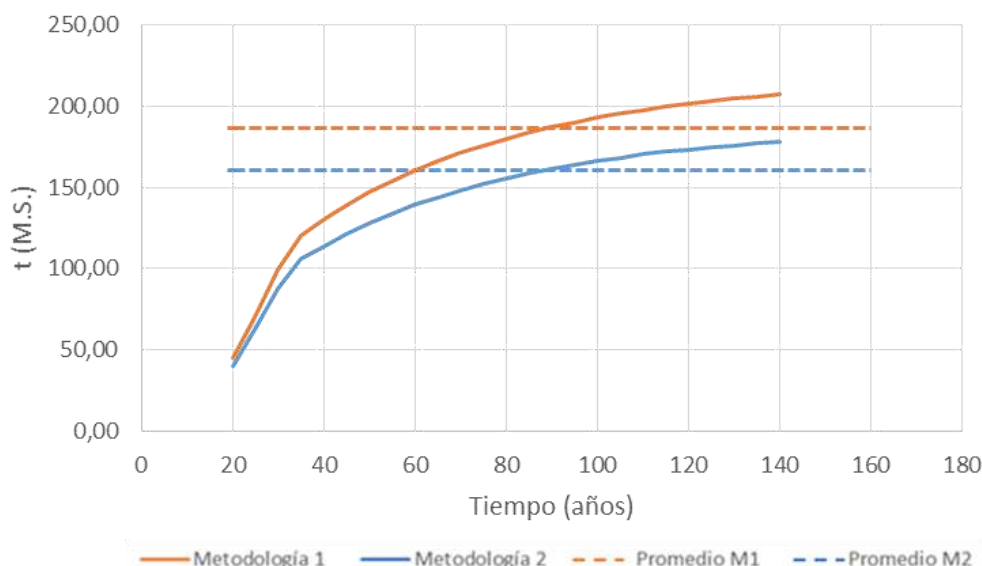


Figura 6. Evolución del volumen de la masa para *Pinus halepensis* a lo largo del turno propuesto (140 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 2}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (49,9 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 7; Tabla 10).

### *Pinus halepensis* - Absorciones

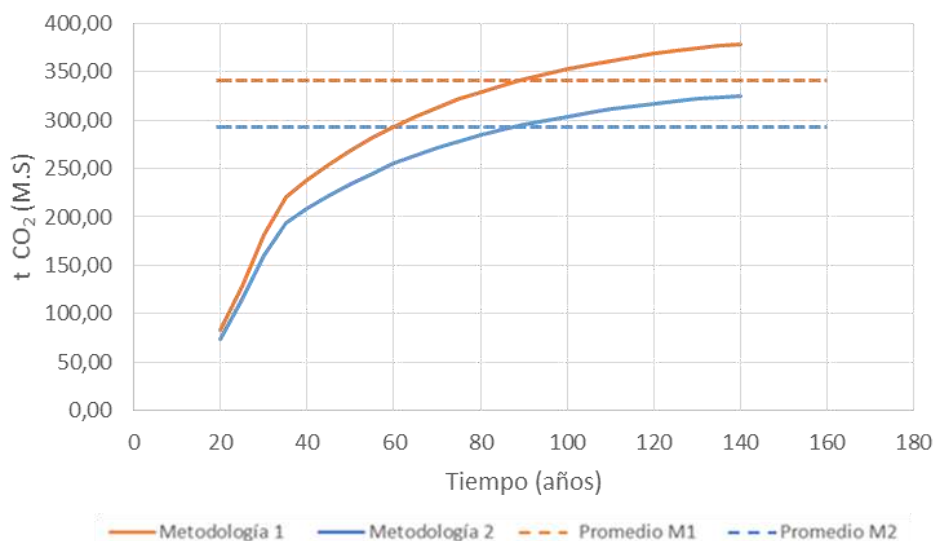


Figura 7. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Pinus halepensis* a lo largo del turno propuesto (140 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 10. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *halepensis* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 140 años               | Montero et al. (2001)<br>Modelo estático |                    |
|-------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                       | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 17,21                                    | 14,85              |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 21,42                                    | 18,46              |
| Absorción media anual (t)     | 31,48                                    | 27,16              |
| Absorción acumulada anual (t) | 39,20                                    | 33,77              |

### 4.3. Pinus nigra

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus nigra* para los casos de conversión de zonas de conservación se emplea el modelo dinámico desarrollado por Mora–Martínez et al. (2012). Las funciones de este modelo han sido obtenidas de la red de parcelas permanentes instaladas por el INIA pertenecientes el Sistema Ibérico oriental, Sierras Costeras mediterráneas, a la Serranía conquense y Alta Alacaría y a las Serranías Béticas. El índice de sitio a la edad de referencia de 80 años varió entre las parcelas de 8 a 27 m (Tabla 11).

Tabla 11. Funciones dinámicas para *Pinus nigra*. El modelo dinámico por el cual se desarrolla la metodología es el contemplado en Mora–Martínez et al. (2012). Sin embargo, por falta de algunas variables y para una modelización adecuada se han incorporado ciertas ecuaciones de del Río et al. (2006). Fuente: del río et al. (2006) y Mora–Martínez et al. (2012).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Ecuaciones                                                                                                                                                              | Fuente                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $H_{02} = 29,7954 \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{H_{01}}{29,7954} \right)^{1,5162} \right] \frac{t_2}{t_1} \right\}^{1,5162}$                                | del Río et al. (2006)                                                        |
| Función de inicialización del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $G = \left( 1,11728 \cdot \left( \frac{100}{\sqrt{N}} \right) + 1,29117 \cdot H_{02} \right)^2 \cdot \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot N$                         | Elaboración propia a partir del diámetro cuadrático de del Río et al. (2006) |
| Función de transición del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $\ln G_2 = \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \cdot \ln G_1 + 3,88 \cdot \left( 1 - \frac{t_1}{t_2} \right) + 0,0475 \cdot \left( 1 - \frac{t_1}{t_2} \right) \cdot H_{01}$ | Mora–Martínez et al. (2012).                                                 |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\ln V = 1,69 + 0,0604 \cdot H_{01} + (-48,8) \cdot t_1^{-1} + 0,982 \cdot \ln G$                                                                                       | Mora–Martínez et al. (2012).                                                 |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación en m, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha, $G_2$ es el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha en $t_2$ obtenida en función del $G_1$ en $t_1$ , V el volumen en m <sup>3</sup> /ha. |                                                                                                                                                                         |                                                                              |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 12).

Tabla 12. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus nigra*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                   | Ecuaciones                                        | Fuente                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(12,642 + (-1,7943) \cdot \ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(12,756 + (-1,8346) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y $Dg$ es al diámetro cuadrático. |                                                   |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Mora–Martínez et al. (2012) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 8).

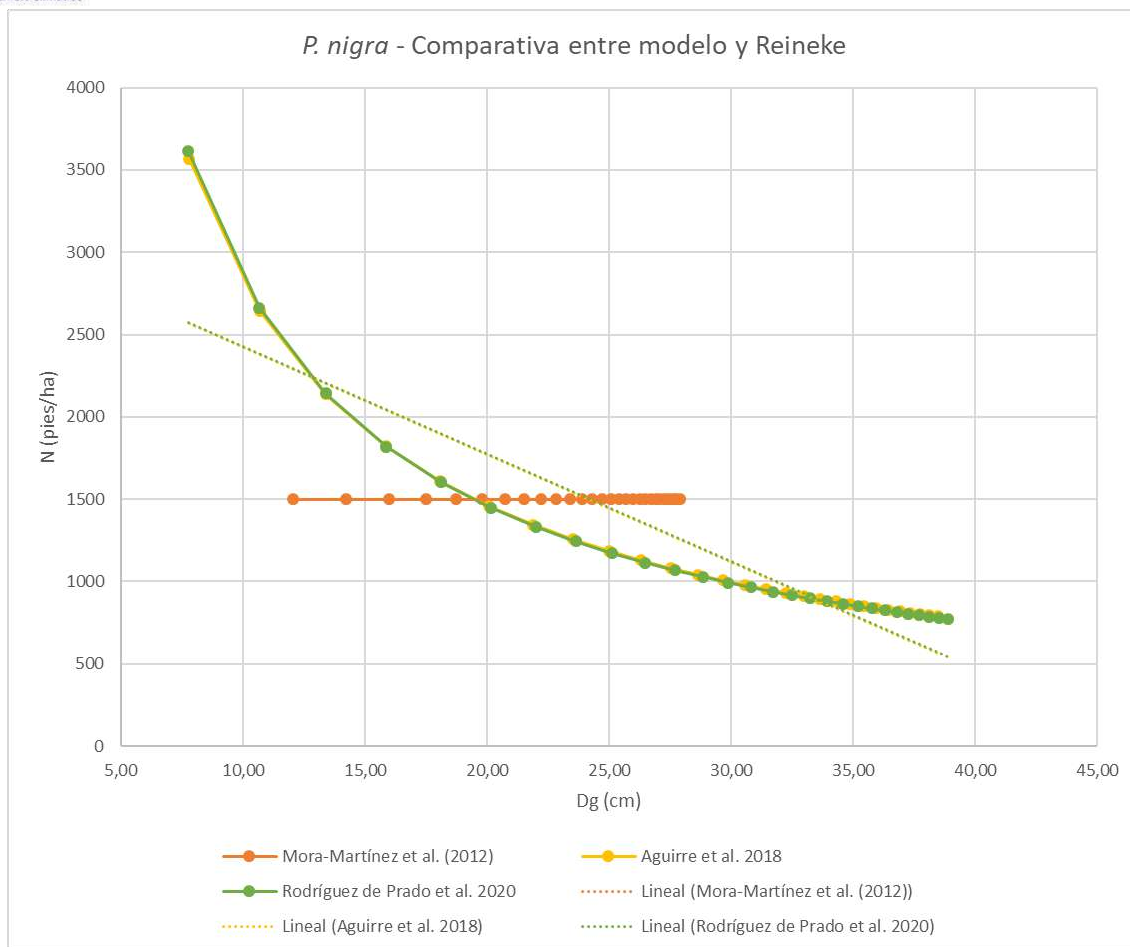


Figura 8. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Mora–Martínez et al. (2001) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 20.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 8 se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Mora–Martínez et al. (2001) no ofrece un variable de densidad. En definitiva, y tras un breve análisis, resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Mora–Martínez et al. (2001):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1.7943} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 960.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 45 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2008).

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 944 y un exponente de 1,8346. Arrojando el mismo resultado.

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 960 o 944 (según el modelo Reineke empleado) desde los 45 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de la Red de Parcelas Permanentes del INIA (del Río et al., 2025). Para el caso de *Pinus nigra*, estos datos son:

- < 60 años: 0,76 %.
- 60–90 años: 0,50 %.
- 90–120 años: 0,54 %.
- > 120 años: 0,80 %.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,7943} \right)^{\frac{1}{1,7943}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

Se realiza el mismo cálculo aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) con el exponente de 1,8346.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 9):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_t$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 13) en combinación con Pita (1967) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 13. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                                 | Fuente      |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                                       | –           |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                                        | –           |
| Volumen individual       | $V_u = 4,285 \cdot \left( \frac{Dg^2 \cdot Hm}{100} \right) + 2,989 \cdot \left( \frac{(Dg^2 \cdot Hm)^2}{10^8} \right)$ | Pita (1967) |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                                  |             |

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Ecuación                                                                                                 | Fuente                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa de fuste                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0219 y $\beta_1$ es 0,9812. | Menéndez–Miguélez et al. (2021) |
| Relación de copa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $W_C \cdot W_T = 0,3526$                                                                                 |                                 |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $R = 0,242$                                                                                              | Ruíz–Peinado et al. (2011)      |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $R = 0,244$                                                                                              | SEI (2024)                      |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, $Dg$ es el diámetro cuadrático, $Hm$ es la altura media, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz–vástago. |                                                                                                          |                                 |

**b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 14).

Tabla 14. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ecuación                                                               | Fuente                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total                                                                                                                                                                                                                                                                       | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste                                                                                                                                                                                                                                                                    | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                           | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad                                                                                                                                                                                                                                                         | $d_{12\%} = 0,48714$                                                   | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa                                                                                                                                                                                                                                                                    | $W_C \cdot W_T = 0,3526$                                               | Menéndez–Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                               | $R = 0,242$                                                            | Ruíz–Peinado et al. (2011)            |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                               | $R = 0,244$                                                            | SEI (2024)                            |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz–vástago. |                                                                        |                                       |

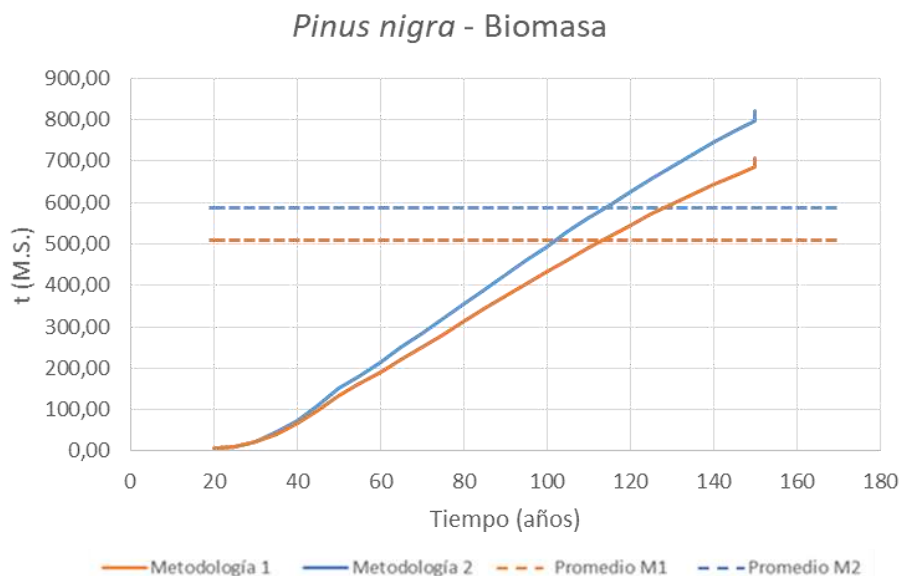


Figura 9. Evolución del volumen de la masa para *Pinus nigra* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (50,9 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 10; Tabla 15).

### Pinus nigra - Absorciones

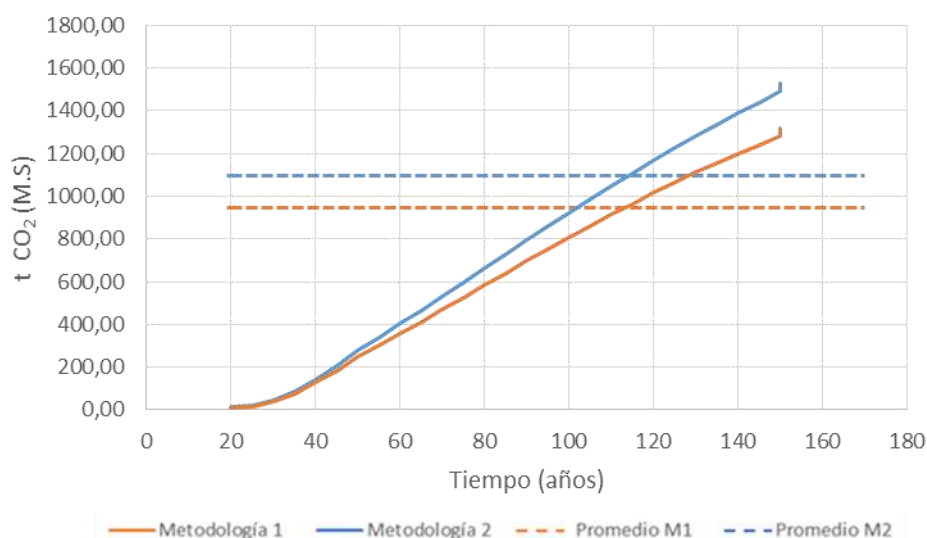


Figura 10. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para Pinus nigra a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 15. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de Pinus nigra a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 150 años               | Mora-Martínez et al. (2012)<br>Modelo dinámico |                    |
|-------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                             | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 2,86                                           | 3,28               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 4,06                                           | 4,67               |
| Absorción media anual (t)     | 5,34                                           | 6,12               |
| Absorción acumulada anual (t) | 7,57                                           | 8,72               |

#### 4.4. *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*, se desarrollan un modelo dinámico. Las funciones para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 16). En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado 4 calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 16, 21 y 26 m.

Tabla 16. Funciones dinámicas para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* de Diéguez–Aranda et al. (2009). La ecuación de altura media es la desarrollada por Rodríguez–Soalleiro (1995). Fuente: Rodríguez–Soalleiro (1995) y Diéguez–Aranda et al. (2009).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Ecuaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $H_{02} = \frac{72,69 - 27,86 \cdot 1 + X_0}{1 - (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot X_0 \cdot t_2^{-1,486}}$ $X_0 = \frac{H_{01} - 72,69 + 27,86 \cdot 1}{1 + (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,486}}$                                                                                                             |
| Altura media                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $H_m = \frac{H_{02} - 0,674092}{1,050719}$                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Función de transición del número de pies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | No existe: apenas existe disminución del número de pies por competencia en las parcelas estudiadas.                                                                                                                                                                                                                            |
| Función de inicialización del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $G = EXP(X_0) \cdot EXP\left(-\left(-167,5 + \left(\frac{999,1 - 50,34 \cdot 1}{X_0}\right)\right) \cdot t^{-0,8936}\right)$ $X_0 = (4,363 - 0,1489 \cdot 1) \cdot IS^{0,07383}$                                                                                                                                               |
| Función de transición del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $G_2 = EXP(X_0) \cdot EXP\left(-\left(-167,5 + \left(\frac{999,1 - 50,34 \cdot 1}{X_0}\right)\right) \cdot t_2^{-0,8936}\right)$ $X_0 = \frac{t_1^{-0,8936}}{2} \cdot \left(-167,5 + t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1)\right) + \sqrt{4 \cdot (999,1 - 50,34 \cdot 1) \cdot t_1^{0,8936} + (167,5 - t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1))^2}$ |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $V = 5,480 \cdot 10^{-4} \cdot Dg^{1,430-0,07553 \cdot 1} \cdot H_0^{1,220} \cdot N^{0,7681+0,02974 \cdot 1}$                                                                                                                                                                                                                  |
| <p>donde N es el número de pies por hectárea, H<sub>02</sub> la altura dominante en m, H<sub>01</sub> es la calidad de estación, H<sub>m</sub> es la altura media en m, t<sub>2</sub> es la edad en años, t<sub>1</sub> es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m<sup>2</sup>/ha, G<sub>2</sub> es el área basimétrica en m<sup>2</sup>/ha en t<sub>2</sub> obtenida en función del G<sub>1</sub> en t<sub>1</sub>, V el volumen en m<sup>3</sup>/ha, N<sub>2</sub> representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N<sub>1</sub>, IS es el índice de sitio, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, H<sub>m</sub> es la altura media en m.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Para el cálculo de la mortalidad se emplea la siguiente ecuación:  $N_n = N_{n-1} - [f(N_{n-1}) - f(N_n)]$ , donde  $N_n$  es la densidad en el tiempo n,  $N_{n-1}$  es la densidad en el momento n-1 y  $f(N)$  es la función de densidad de la especie. Esta ecuación se aplica de forma consecutiva hasta conocer la densidad observada en el momento deseado (tiempo n). Se trata de una aproximación para el cálculo de mortalidad a partir de una densidad inicial establecida (n-1). Empleando la ecuación de densidad estática de Rodríguez–Soalleiro (1995):  $\frac{100}{\sqrt{N}} = 1,8397 + 0,0175 \cdot H_{02}^{1,65}$ . Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 17).

Tabla 17. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus pinaster subsp. atlantica*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                   | Ecuaciones                                       | Fuente                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(13,341 + (-1,9825) \cdot Ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(13,096 + (-1,9063) \cdot Ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y $Dg$ es al diámetro cuadrático. |                                                  |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Diéguez–Aranda et al. (2009) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 11).

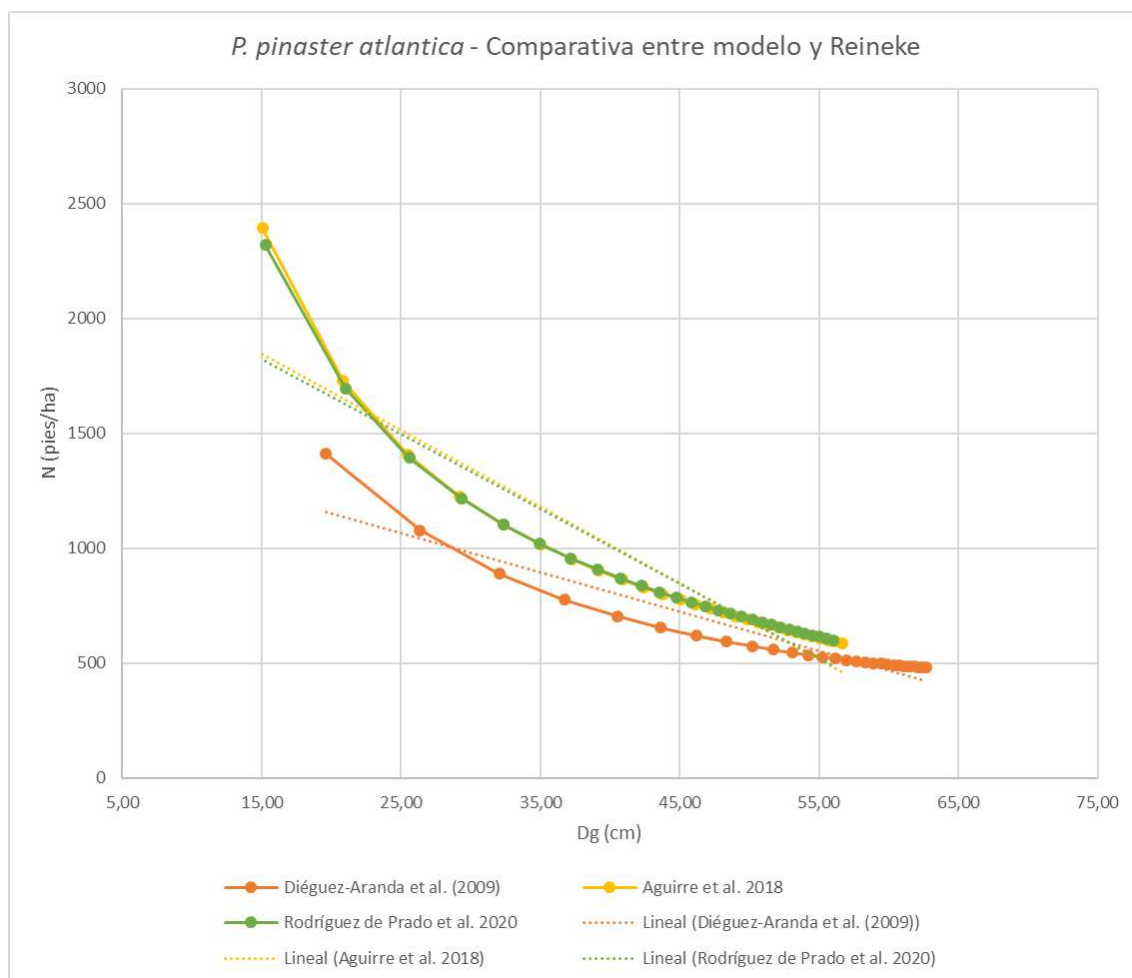


Figura 11. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 16.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 11, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) ofrece un valor de densidad similar a su potencial valor máximo. En definitiva, y tras un breve análisis, no parece necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático ( $Dg$ ) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1.9825} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 1104.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 20 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018).

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 1053 y un exponente de 1,9063. Arrojando el mismo resultado.

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del para  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie.

A partir del cálculo del SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica ( $G$ ) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1.9825} \right)^{\frac{1}{1.9825}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

Se realiza el mismo cálculo aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) con el exponente de 1,9063.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 12):

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $Wt$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $Vu$ ) y la biomasa del árbol medio ( $Wu$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 18) en combinación con Diéguez–Aranda (2009) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

**Tabla 18. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.**

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                 | Fuente                          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                       | –                               |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                        | –                               |
| Volumen individual       | $V_u = 0,036115 \cdot dg^{2,1249} \cdot Hm^{0,84716}$                                                    | Diéguez-Aranda (2009)           |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                  | Menéndez-Miguélez et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0175 y $\beta_1$ es 0,9961. |                                 |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = 0,1873$                                                                                 |                                 |
| Relación raíz-vástago    | $R = 0,285$                                                                                              | Ruíz-Peinado et al. (2011)      |
| Relación raíz-vástago    | $R = 0,284$                                                                                              | SEI (2024)                      |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $V$  es el volumen del rodal en  $m^3/ha$ ,  $BEF$  es el factor de expansión de biomasa,  $V_u$  es el volumen de árbol individual,  $W_u$  es la biomasa del árbol unitario,  $Dg$  es el diámetro cuadrático,  $Hm$  es la altura media en m,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y  $R$  es la relación raíz-vástago.

**b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 19).

**Tabla 19. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.**

| Atributo                    | Ecuación                                                               | Fuente                                |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total               | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste            | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                           | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,5285$                                                    | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_C \cdot W_T = 0,1873$                                               | Menéndez-Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,285$                                                            | Ruíz-Peinado et al. (2011)            |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,284$                                                            | SEI (2024)                            |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $d_{(12\%)}$  es la densidad al 12 % de humedad,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $V$  es el volumen del rodal en  $m^3/ha$ ,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y  $R$  es la relación raíz-vástago.

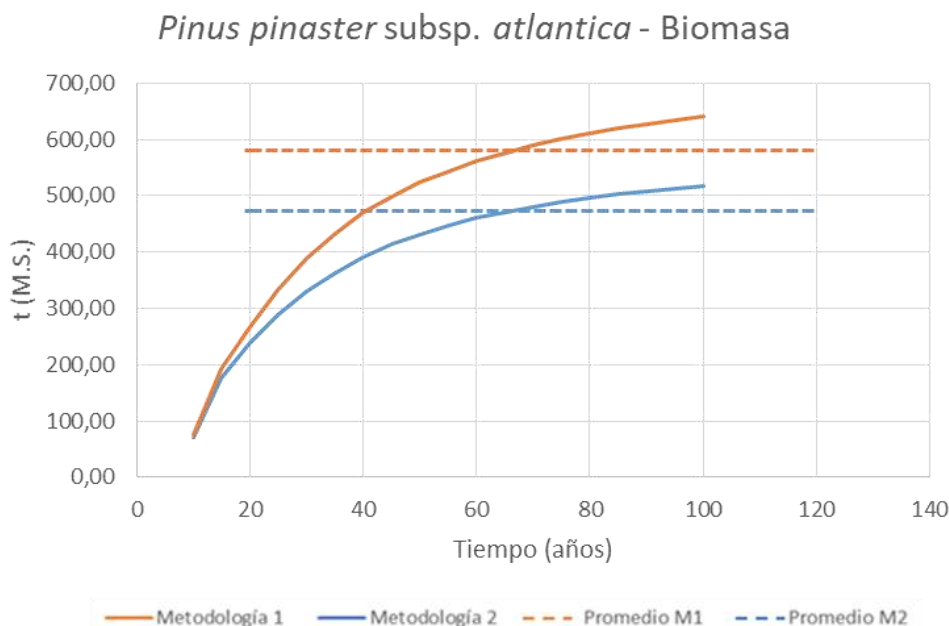


Figura 12. Evolución del volumen de la masa para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* a lo largo del turno propuesto (100 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (51,1 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 13; Tabla 20).

### *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* - Absorciones

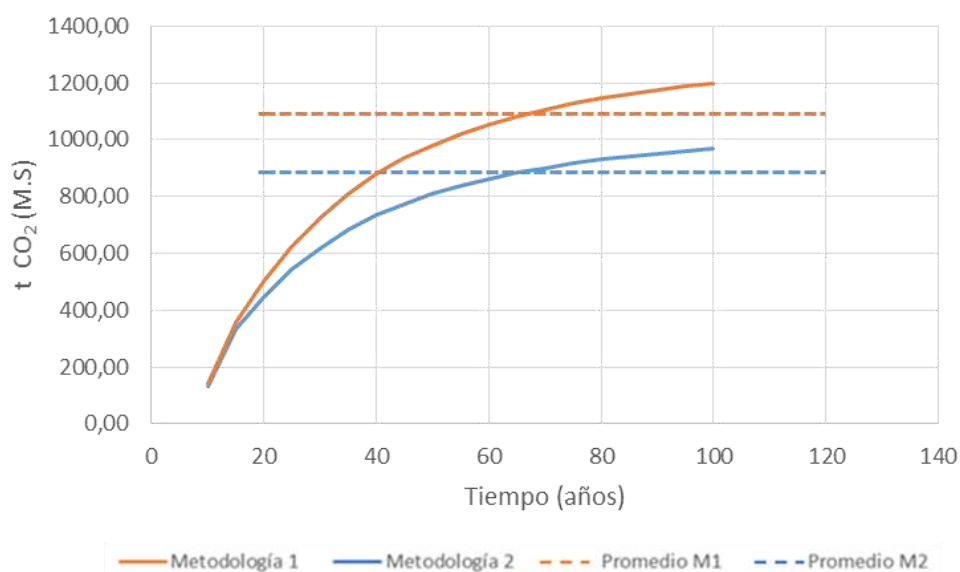


Figura 13. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* a lo largo del turno propuesto (100 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 20. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 20, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 150 años               | Diéguez-Aranda et al. (2009).<br>Modelo dinámico |                    |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                               | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 5,81                                             | 4,73               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 6,40                                             | 5,17               |
| Absorción media anual (t)     | 10,88                                            | 8,86               |
| Absorción acumulada anual (t) | 12,00                                            | 9,69               |

#### 4.5. *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*, se desarrolla un modelo dinámico. Como ejemplo del modelo dinámico para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* se han empleado las relaciones fundamentales desarrolladas en Bravo-Oviedo et al. (2004) (Tabla 21). Los datos han sido obtenidos de 92 parcelas permanentes del INIA-ICIFOR. En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado 5 calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 12, 15 18, 21 m.

Tabla 21. Funciones dinámicas para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*. La ecuación de altura media es la desarrollada por Rodríguez-Soalleiro (1995). La ecuación de inicialización del área basimétrica es la obtenida en del Río et al. (2006). Fuente: Rodríguez-Soalleiro (1995), Bravo-Oviedo et al. (2004), del Río et al. (2006).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ecuaciones                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $H_{02} = EXP\left(4,016 + (LnH_{01} - 4,016) \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,5031}\right)$                               |
| Altura media                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $H_m = \frac{H_{02} - 0,674092}{1,050719}$                                                                                       |
| Función de transición del número de pies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $N_2 = N_1 \cdot EXP(-0,00069 \cdot (t_2 - t_1))$                                                                                |
| Función de inicialización del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $Dg = -11,65 + 6,634 \cdot \frac{100}{\sqrt{N}} + 0,716 \cdot H_0 (1)$ $G = \frac{\pi}{40000} \cdot Dg^2 \cdot N (2)$            |
| Función de transición del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $LnG_2 = \left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot LnG_1 + \left((4,746618 + 0 \cdot IS) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)$ |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $LnV = 1,916498 + 0,061317 \cdot IS + \left(\frac{-34,2235}{t}\right) + 0,849985 \cdot LnG$                                      |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación, $H_m$ es la altura media en m, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha, $G_2$ es el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha en $t_2$ obtenida en función del $G_1$ en $t_1$ , V el volumen en m <sup>3</sup> /ha, $N_2$ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior $N_1$ , IS es el índice de sitio, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, $H_m$ es la altura media en m. |                                                                                                                                  |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 22).

Tabla 22. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                 | Ecuaciones                                       | Fuente                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                          | $N_{max} = EXP(13,341 + (-1,9825) \cdot Ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima                                                                          | $N_{max} = EXP(13,096 + (-1,9063) \cdot Ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y Dg es al diámetro cuadrático. |                                                  |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Bravo-Oviedo et al. (2004) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 14).

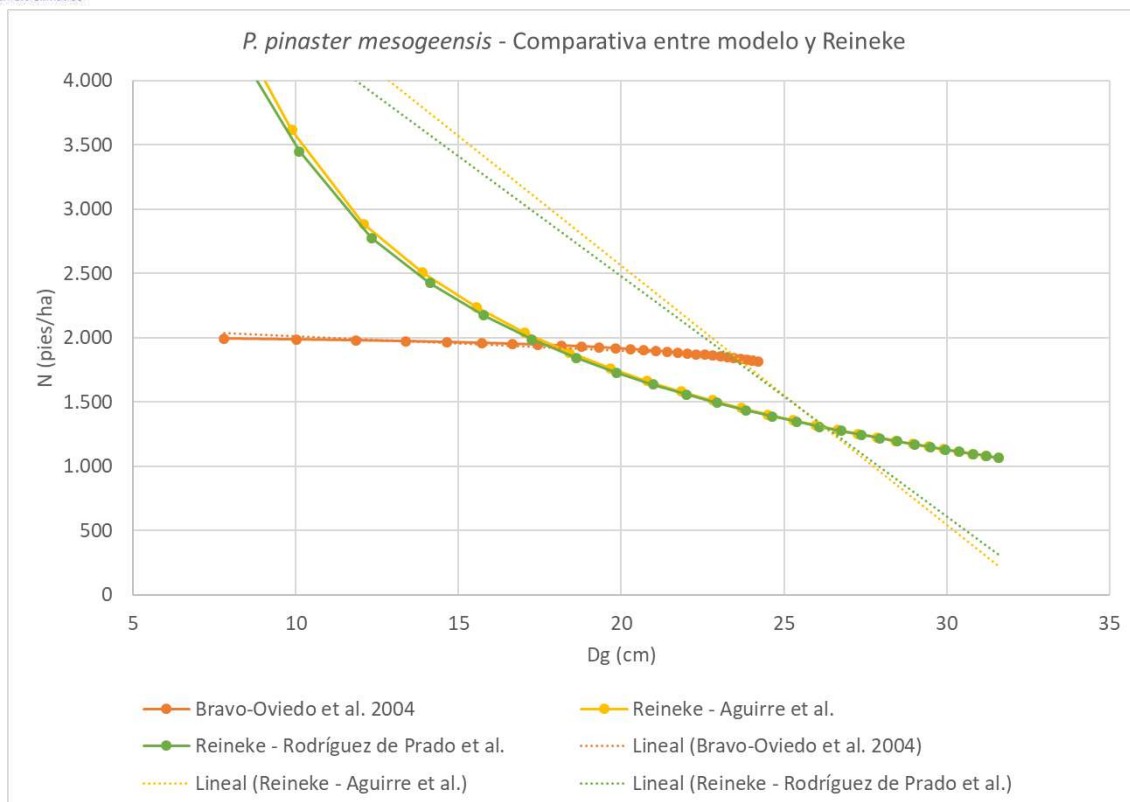


Figura 14. Comparativa del tamaño máximo-densidad entre el modelo de crecimiento de Bravo-Oviedo et al. (2004) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 15.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 14, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Bravo-Oviedo et al. (2004) ofrece un valor de densidad muy inferior a su potencial valor máximo hasta 17-18 cm de diámetro cuadrático. A partir de ese tamaño, el modelo sobreestima su densidad. En definitiva, y tras un breve análisis, resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Bravo-Oviedo et al. (2004):

$$SDI = N_{max} \cdot \left( \frac{Dg}{25} \right)^{1.9825} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 1104.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 70 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018).

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 1053 y un exponente de 1,9063. Arrojando el mismo resultado.

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor de  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 1104 desde los 70 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de la Red de Parcelas Permanentes del INIA (del Río et al., 2025). Para el caso de *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*, estos datos son:

- < 40 años: 0,2 %.
- 40–60 años: 0,6 %.
- 60–80 años: 0,7 %.
- > 80 años: 1,1 %.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,9825} \right)^{\frac{1}{1,9825}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

Se realiza el mismo cálculo aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) con el exponente de 1,9063.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 15):

- c) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_t$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguel et al. (2021) (Tabla 24) en combinación con Diéguez–Aranda et al. (2009) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024) (Tabla 23).

Tabla 23. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                 | Fuente                         |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T (t \text{ M.S.}) = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                       | –                              |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                        | –                              |
| Volumen individual       | $V_u = 0,036115 \cdot dg^{2,1249} \cdot Hm^{0,84716}$                                                    | Menéndez–Miguel et al. (2021). |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T)$                                                                      | Diéguez–Aranda et al. (2009)   |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0175 y $\beta_1$ es 0,9961. |                                |
| Relación de copa         | $W_C - W_T = 0,1873$                                                                                     |                                |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,285$                                                                                              | Ruiz–Peinado et al. (2011).    |

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Ecuación    | Fuente     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $R = 0,284$ | SEI (2024) |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en $m^3$ /ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, $D_g$ es el diámetro cuadrático, $H_m$ es la altura media en m, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago. |             |            |

- d) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 24).

Tabla 24. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología.

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ecuación                                                               | Fuente                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Biomasa total                                                                                                                                                                                                                                                                   | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                           |
| Biomasa de<br>fuste                                                                                                                                                                                                                                                             | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                           | Vieilledent et al.<br>(2018)                |
| Densidad al<br>12 % de<br>humedad                                                                                                                                                                                                                                               | $d_{12\%} = 0,5285$                                                    | Gutiérrez Oliva y<br>Plaza Pulgar<br>(1967) |
| Relación de<br>copa                                                                                                                                                                                                                                                             | $W_C \cdot W_T = 0,1873$                                               | Menéndez-<br>Miguélez et al.<br>(2021)      |
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                       | $R = 0,285$                                                            | Ruiz-Peinado et<br>al. (2011)               |
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                       | $R = 0,284$                                                            | SEI (2024)                                  |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en $m^3$ /ha, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago. |                                                                        |                                             |

### *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* - Biomasa

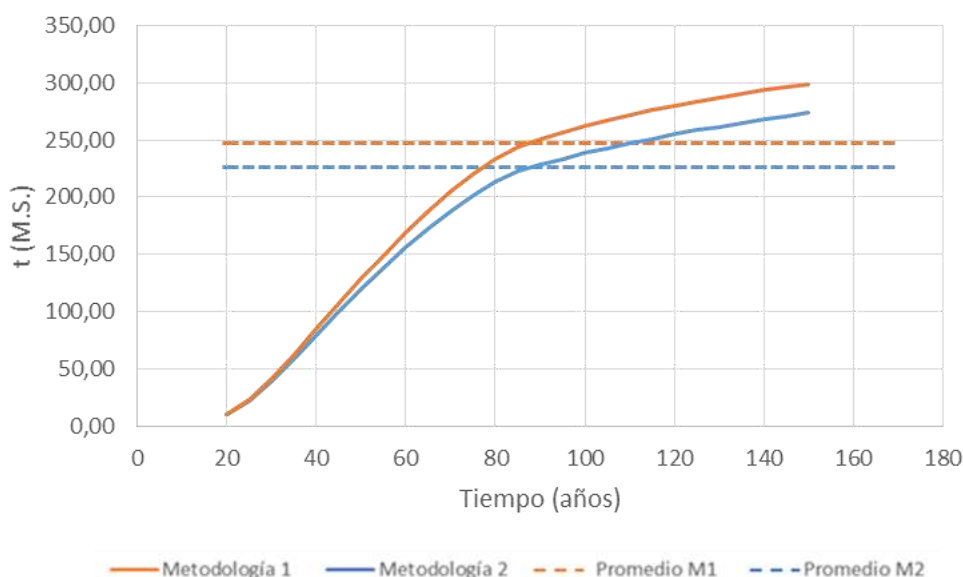


Figura 15. Evolución del volumen de la masa para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (51,1 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 16; Tabla 25).

### *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* - Absorciones

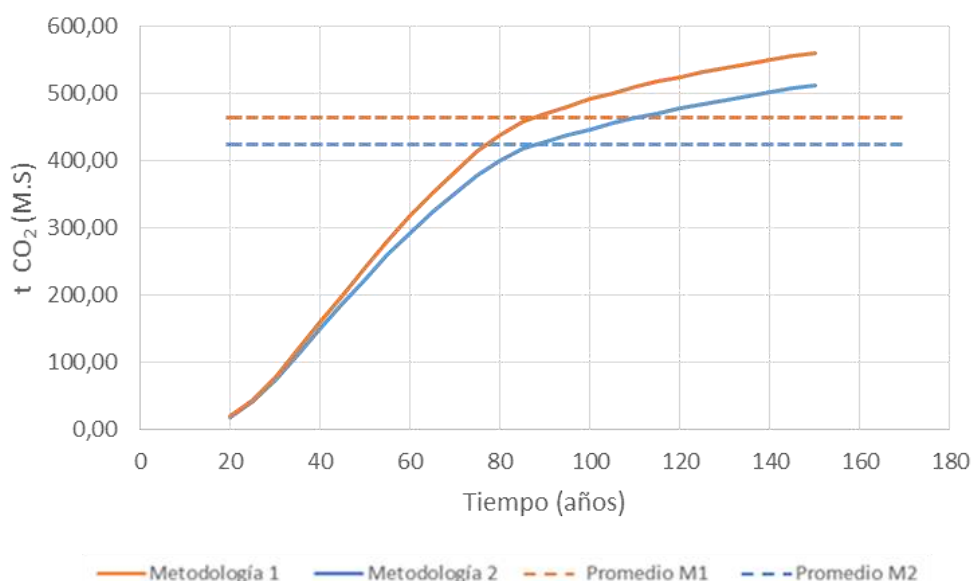


Figura 16. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 25. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 150 años               | Bravo-Oviedo et al. (2004).<br>Modelo dinámico |                    |
|-------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                             | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 1,68                                           | 1,56               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 2,02                                           | 1,87               |
| Absorción media anual (t)     | 3,15                                           | 2,92               |
| Absorción acumulada anual (t) | 3,78                                           | 3,51               |

#### 4.6. *Pinus pinea*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinea* para los casos de conversión de zonas de conservación, se emplea una variante dinamización del modelo estático desarrollado por Calama et al. (2003) a partir de la metodología de Calama et al. (2007) de ecuación de incremento en diámetro de árbol individual para periodos de 5 años. Los detalles de esta dinamización están descritos en Núñez Manso et al. (2025). Las funciones del modelo de crecimiento han sido obtenidas del inventario de España en el cual se describen repoblaciones forestales para esta especie. En este documento (Calama et al. 2003), se define una edad de referencia de 100 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 13, 17 y 21 m (Tabla 26).

Tabla 26. Funciones empleadas para la variante como modelo dinámico del *Pinus pinea*. Fuente: Calama et al. (2003) y Calama et al. (2007).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Ecuaciones                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Índice de sitio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $SI = EXP\left(4,1437 + (\ln(H_0) - 4,1437) \cdot \left(\frac{t}{100}\right)^{-0,3935}\right)$                                                                              |
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $H_{02} = EXP\left(4,1437 + (\ln(H_{01}) - 4,1437) \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,3935}\right)$                                                                     |
| Altura media                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $Hm = -0,3398 + 0,9649 \cdot H_{02}$                                                                                                                                        |
| Densidad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $N = \left(\frac{100}{(4,4965 + 0,0221 \cdot H_0 \cdot \sqrt{t_2})}\right)^2$                                                                                               |
| Diámetro cuadrático ("inicialización")                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $Dg = -1,632 + 1,2068 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}}\right) + 2,1027 \cdot H_{02}$                                                                                        |
| Diámetro medio cuadrático ("transición")                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $Dg_2 = Dg_1 + \left(\frac{t_2 - t_1}{5}\right) \cdot (EXP(2,2383 - 0,3372 \cdot \ln(Dg_1) - 0,02664 \cdot H_{01} - 0,1516 \cdot \ln(N_1) + 0,0412 \cdot SI + 0,3376) - 1)$ |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $V = 3,3914 + 0,4414 \cdot G \cdot H_{02}$                                                                                                                                  |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia en años, $Dg$ el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m <sup>3</sup> /ha, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha y Hm la altura media en m. |                                                                                                                                                                             |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 27).

Tabla 27. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus pinea*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                   | Ecuaciones                                        | Fuente                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(13,385 + (-2,1220) \cdot \ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = EXP(13,562 + (-2,1855) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y $Dg$ es al diámetro cuadrático. |                                                   |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Calama et al. (2003) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 17).

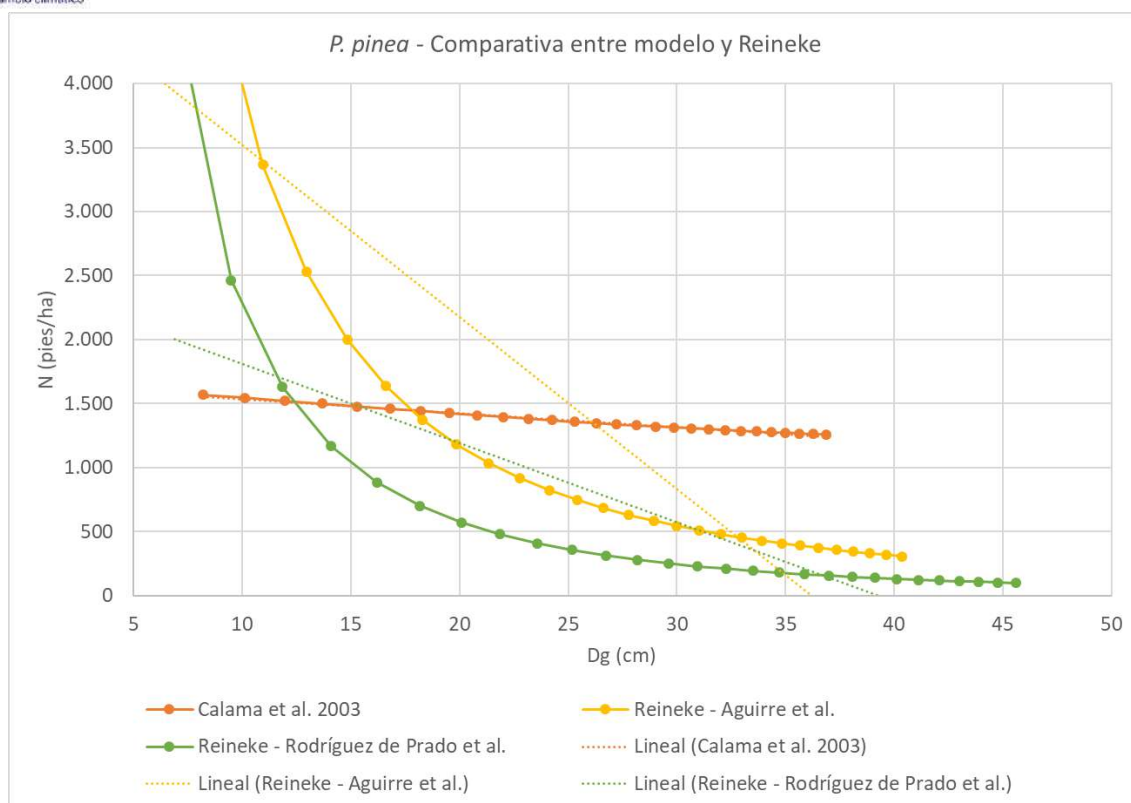


Figura 17. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Calama et al. (2003) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 13.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 17, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Calama et al. (2003) y Calama et al. (2007) ofrece un valor de densidad muy inferior a su potencial valor máximo hasta 12–16 cm de diámetro cuadrático. A partir de ese tamaño, el modelo sobreestima su densidad. En definitiva, y tras un breve análisis, resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Bravo–Oviedo et al. (2004):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{2.1220} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 1040.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 60 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018).

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 1053 y un exponente de 2,1855. Arrojando el mismo resultado.

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del para  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 1040 desde los 60 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de la Red de Parcelas Permanentes del INIA. Para el caso de *Pinus pinea*, estos datos son:

- < 50 años: 0,1 %.
- 50–100 años: 0,2 %.
- 100–150 años: 0,3 %.
- > 150 años: 0,4 %.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{2,1220} \right)^{\frac{1}{2,1220}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

Se realiza el mismo cálculo aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) con el exponente de 2,1855.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 18):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_t$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 28) en combinación con Pita (1967) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 28. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                                       | Fuente                          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                                             | –                               |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                                              | –                               |
| Volumen individual       | $V_u = 5,61 + 3,935 \cdot \left( \frac{Dg^2 \cdot Hm}{100} \right) + 4,21 \cdot \left( \frac{(Dg^2 \cdot Hm)^2}{10^8} \right)$ | Pita (1967)                     |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                                        | Menéndez–Miguélez et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0294 y $\beta_1$ es 0,9573.                       |                                 |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$ , donde $\beta_2$ es 1,0891 y $\beta_3$ es –0,1152.                  |                                 |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,243$                                                                                                                    | Ruiz–Peinado et al. (2011)      |

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ecuación    | Fuente     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $R = 0,183$ | SEI (2024) |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, $Dg$ es el diámetro cuadrático, $Hm$ es la altura media, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_{C-W_T}$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz-vástago. |             |            |

**b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 29).

Tabla 29. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ecuación                                                                                                  | Fuente                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Biomasa total                                                                                                                                                                                                                                                                   | $W_T (t M.S) = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$                                                 | –                                           |
| Biomasa de<br>fuste                                                                                                                                                                                                                                                             | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                                                              | Vieilledent et al.<br>(2018)                |
| Densidad al<br>12 % de<br>humedad                                                                                                                                                                                                                                               | $d_{12\%} = 0,60625$                                                                                      | Gutiérrez Oliva y<br>Plaza Pulgar<br>(1967) |
| Relación de<br>copa                                                                                                                                                                                                                                                             | $W_{C-W_T} = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$ , donde $\beta_2$ es 1,0891 y $\beta_3$ es -0,1152. | Menéndez-<br>Miguélez et al.<br>(2021)      |
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                       | $R = 0,243$                                                                                               | Ruiz-Peinado et<br>al. (2011)               |
| Relación raíz-<br>vástago                                                                                                                                                                                                                                                       | $R = 0,183$                                                                                               | SEI (2024)                                  |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $V$ es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , $W_{C-W_T}$ es la relación de copa y $R$ es la relación raíz-vástago. |                                                                                                           |                                             |

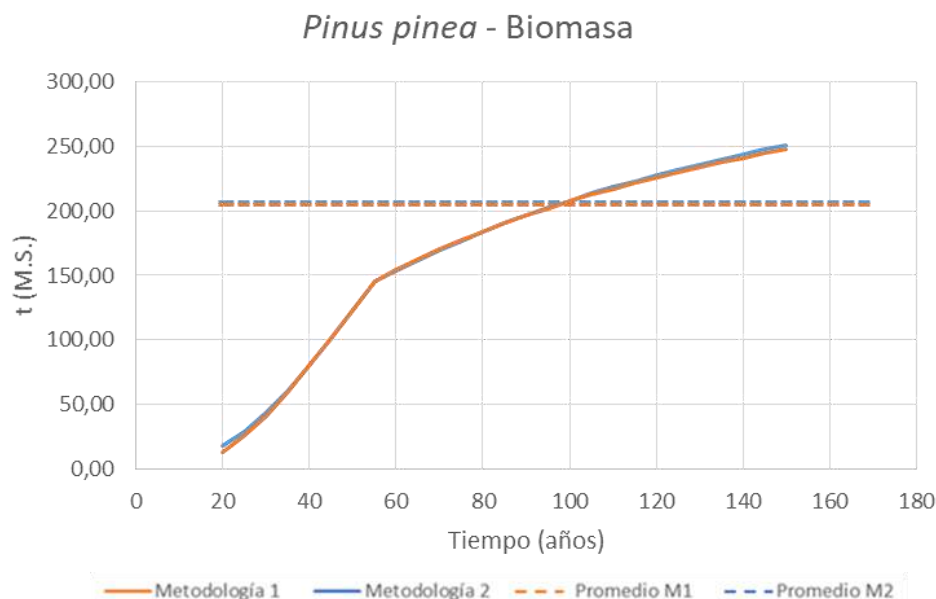


Figura 18. Evolución del volumen de la masa para *Pinus pinea* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (50,8 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 19; Tabla 30).

### Pinus pinea - Absorciones

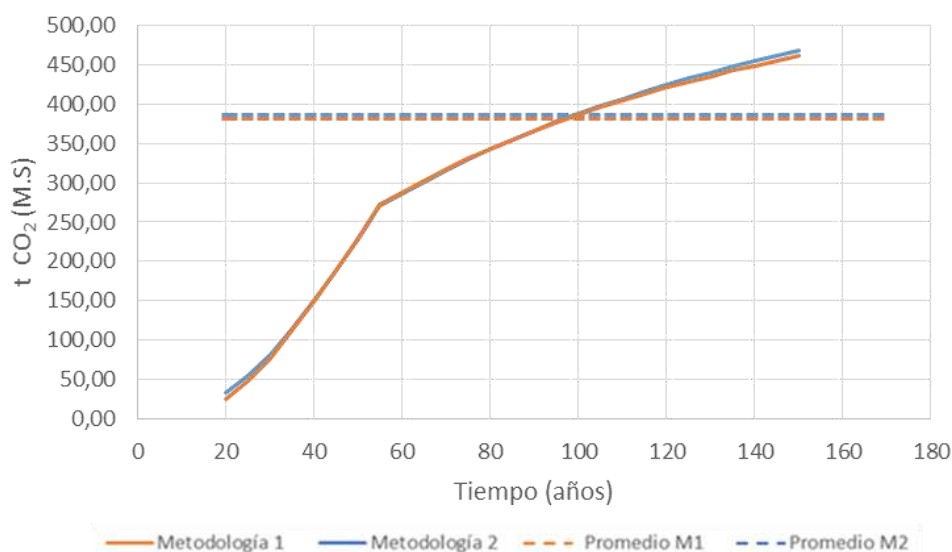


Figura 19. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para Pinus pinea a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 30. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de Pinus nigra a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 150 años               | Calama et al. (2003) y Calama et al. (2007).<br>Modelo "dinámico" |                    |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                                                | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 0,80                                                              | 0,81               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 1,00                                                              | 1,01               |
| Absorción media anual (t)     | 1,50                                                              | 1,51               |
| Absorción acumulada anual (t) | 1,86                                                              | 1,88               |

#### 4.7. *Pinus radiata*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus radiata* para los casos de conversión de zonas de conservación se emplea el modelo dinámico desarrollado por Diéguez-Aranda et al. (2009). las funciones para *Pinus radiata* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 16, 21 y 26 m (Tabla 31).

Tabla 31. Funciones dinámicas para *Pinus radiata*. El modelo dinámico por el cual se desarrolla la metodología es el contemplado en Diéguez-Aranda et al. (2009). Sin embargo, la altura media es el desarrollada por Sánchez et al. (2003). Fuente: Sánchez et al. (2003) y Diéguez-Aranda et al. (2009).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ecuaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $H_{02} = H_{01} \cdot \left( \frac{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_2)}{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1)} \right)^{\left( -1,755 + \frac{12,44}{X_0} \right)}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left( (\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,44 \cdot L_0} \right)$ $L_0 = \ln(1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1))$ |
| Altura media                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $H_m = -1,79677 + 0,84463 \cdot H_{02} + 173,96973 \cdot N^{-0,68}$                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Función de transición del número de pies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $N_2 = (N_1^{-0,3161} + 1,053^{(t_2-100)} - 1,053^{(t_1-100)})^{\frac{-1}{0,3161}}$                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Función de inicialización del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $G = -52,23 + 2,676 \cdot t_2 + 1,306 \cdot H_{01} + 0,01008 \cdot N$                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Función de transición del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $G_2 = \text{EXP}(X_0) \cdot \text{EXP} \left( - \left( -276,1 + \frac{1391}{X_0} \right) \cdot t_2^{0,9233} \right)$ $X_0 = \frac{t_1^{-0,9233}}{2} \cdot \left( -276,1 + t_1^{0,9233} \cdot \ln(G_1) \right.$ $\left. + \sqrt{4 \cdot 1391 \cdot t_1^{0,9233} + (276,1 - t_1^{0,9233} \cdot \ln(G_1))^2} \right)$                                            |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $V = (G \cdot H_{02})^{0,9987-0,002232 \cdot t_2} \cdot \text{EXP}(-0,9635 + 0,011703 \cdot t_2)$                                                                                                                                                                                                                                                              |
| donde N es el número de pies por hectárea, $H_{02}$ la altura dominante en m, $H_{01}$ es la calidad de estación, $H_m$ es la altura media en m, $t_2$ es la edad en años, $t_1$ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha, $G_2$ es el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha en $t_2$ obtenida en función del $G_1$ en $t_1$ , $N_2$ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior $N_1$ , V el volumen en m <sup>3</sup> /ha y $H_m$ es la altura media en m. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke (Tabla 32):

Tabla 32. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus radiata*. Fuente: Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                   | Ecuaciones                                               | Fuente                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                            | $N_{max} = \text{EXP}(12,947 + (-1,8254) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde $N_{max}$ es el número máximo de pies por hectárea y $Dg$ es al diámetro cuadrático. |                                                          |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Diéguez-Aranda et al. (2009). con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de la densidad máxima ofrecida por Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 20).

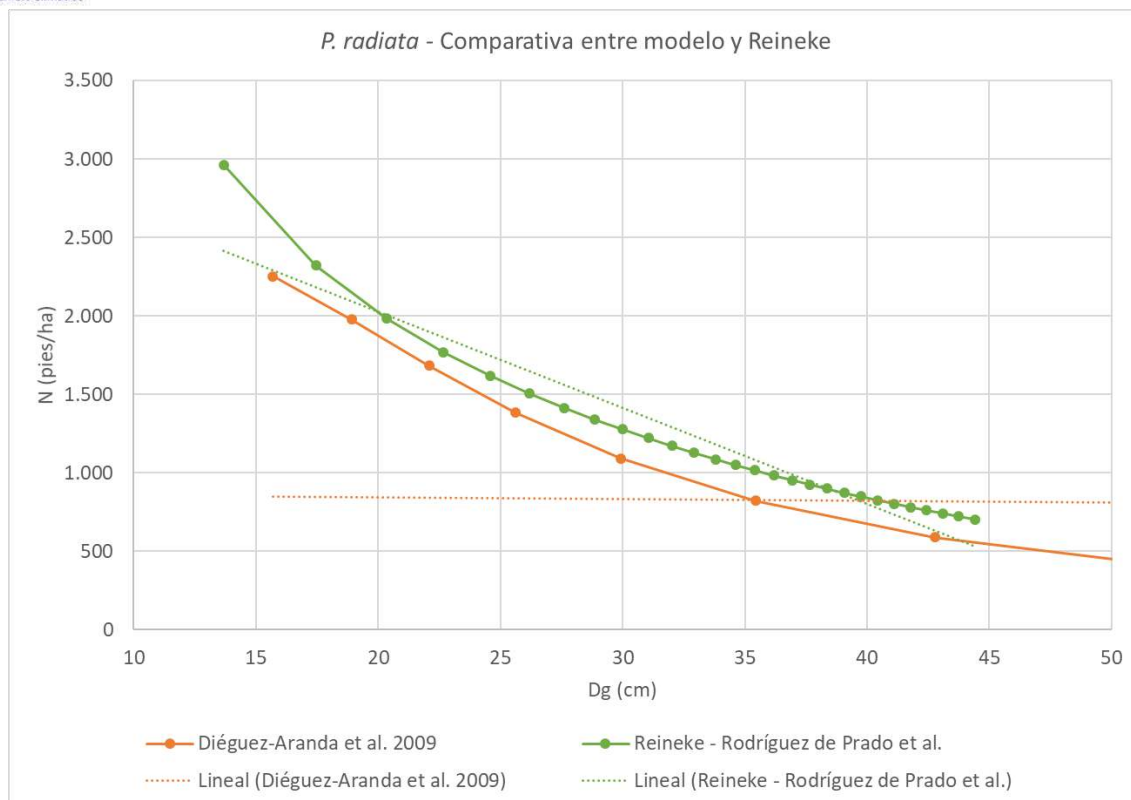


Figura 20. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por el modelo de Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 21.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 20 se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) ofrece un valor de densidad similar a su potencial valor máximo. En definitiva, y tras un breve análisis, no resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Rodríguez de Prado et al. (2020) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009):

$$SDI = N_{max} \cdot \left( \frac{Dg}{25} \right)^{1.8254} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Rodríguez de Prado et al. (2020) toma un valor de 1178.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 20 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del para  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la

especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 1104 desde los 20 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de Crecente-Campo et al. (2009). Para el caso de *Pinus radiata*, estos datos son: 6,27 % en 3 años y 16,31 % en 6 años.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,8254} \right)^{\frac{1}{1,8254}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 21):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_T$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) (Tabla 22) en combinación con HAZI Fundazioa y SEI (2024).

Tabla 33. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                 | Fuente                          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                       | –                               |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                        | –                               |
| Volumen individual       | $V_u = EXP(-3,01274 + 1,86004 \cdot \ln(Dg) + 1,01738 \cdot \ln(Hm))$                                    | HAZI Fundazioa                  |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                  | Menéndez-Miguélez et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0337 y $\beta_1$ es 0,9239. |                                 |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = 0,1129$                                                                                 |                                 |
| Relación raíz-vástago    | $R = 0,274$                                                                                              | SEI (2024)                      |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $V$  es el volumen del rodal en  $m^3/ha$ ,  $BEF$  es el factor de expansión de biomasa,  $V_u$  es el volumen de árbol individual,  $W_u$  es la biomasa del árbol unitario,  $Dg$  es el diámetro cuadrático,  $Hm$  es la altura media en m,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y  $R$  es la relación raíz-vástago.

- b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de SEI

(2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 34).

Tabla 34. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología.

| Atributo                    | Ecuación                                                           | Fuente                                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total               | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste            | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                       | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,441$                                                 | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_C - W_T = 0,1129$                                               | Menéndez–Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz–vástago       | $R = 0,274$                                                        | SEI (2024)                            |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $d_{12\%}$  es la densidad al 12 % de humedad,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en  $m^3$  /ha,  $W_C - W_T$  es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

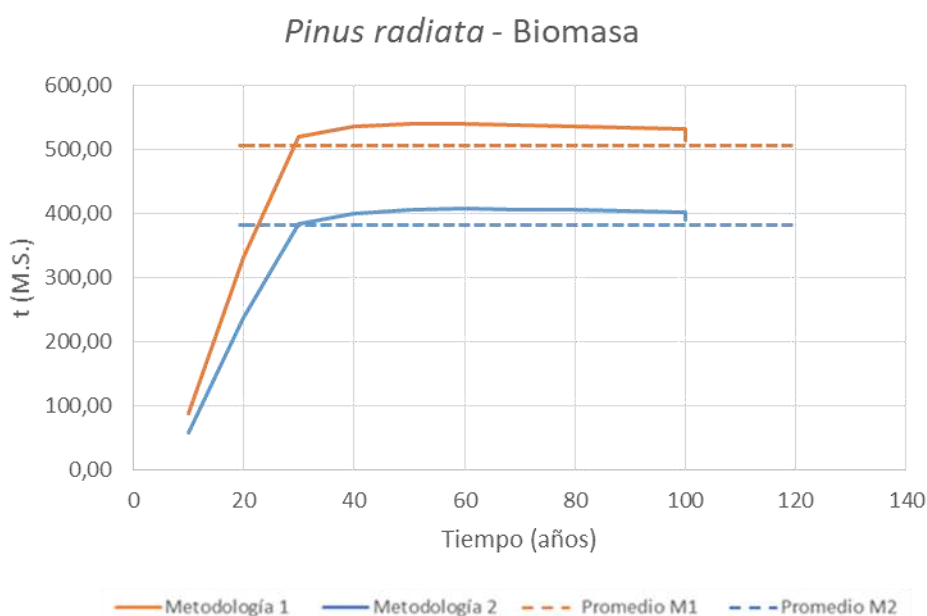


Figura 21. Evolución del volumen de la masa para *Pinus radiata* a lo largo del turno propuesto (100 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 21, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (49,7 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido.

Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 22; Tabla 35).

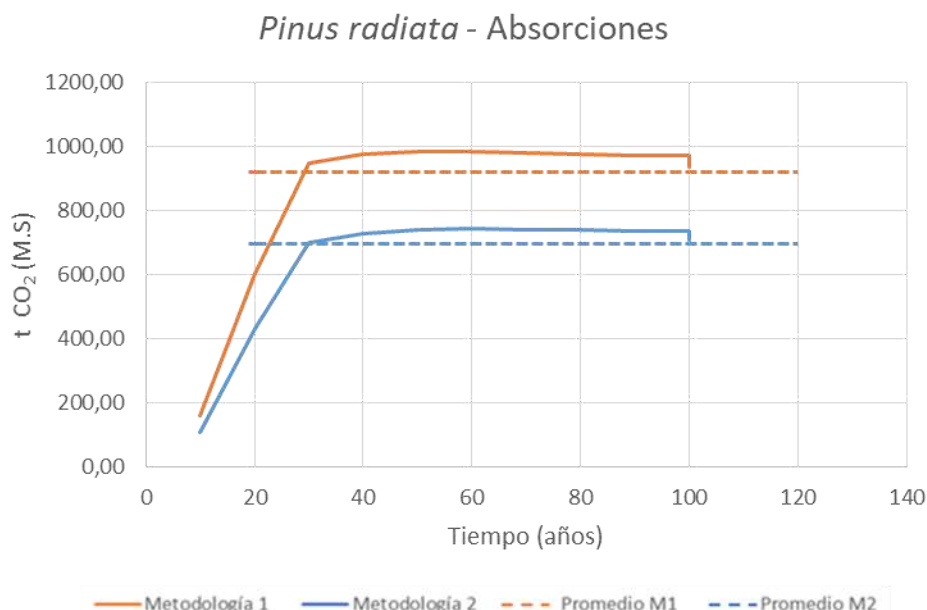


Figura 22. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Pinus radiata* a lo largo del turno propuesto (100 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 21, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de SEI (2024).

Tabla 35. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pinus radiata* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 21, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de SEI (2024).

| Turno: 100 años               | Diéguez-Aranda et al. (2009)<br>Modelo dinámico |                    |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                              | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 4,42                                            | 3,34               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 4,65                                            | 3,55               |
| Absorción media anual (t)     | 8,05                                            | 6,08               |
| Absorción acumulada anual (t) | 8,48                                            | 6,47               |

#### 4.8. *Pinus sylvestris*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus sylvestris*, se desarrolla el modelo dinámico de Diéguez–Aranda et al. (2009). Las funciones para *Pinus sylvestris* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 36). En este documento, se define una edad de referencia de 40 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 5, 10, 15 y 20 m.

Tabla 36. Funciones dinámicas para *Pinus sylvestris*. La ecuación de altura media ha sido obtenida del modelo de del Río (1999). Fuente: del Río et al. (1999) y Diéguez–Aranda et al. (2009).

| Atributo                                       | Ecuaciones                                                                                                      |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                               | $H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}}$   |
| Altura media                                   | $Hm = -1,155649 + 0,976772 \cdot H_{02}$                                                                        |
| Función de transición del número de pies       | $N_2 = (N_1^{-1,590} + 1,138 \cdot 10^{-12} \cdot H_{01} \cdot (t_2^{3,308} - t_1^{3,308}))^{\frac{-1}{1,590}}$ |
| Función de inicialización del área basimétrica | $G = 92,40 \cdot EXP\left(-\left(\frac{1593}{H_{01}}\right) \cdot t_2^{-1,369}\right)$                          |
| Función de transición del área basimétrica     | $G_2 = 92,40 \cdot \left(\frac{G_1}{92,40}\right)^{\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,369}}$                       |
| Volumen                                        | $V = 0,5908 \cdot G^{0,9981} \cdot H_{02}^{0,8844}$                                                             |

donde N es el número de pies por hectárea,  $H_{02}$  la altura dominante en m,  $H_{01}$  es la calidad de estación, Hm es la altura media en m,  $t_2$  es la edad en años,  $t_1$  es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m<sup>2</sup> /ha,  $G_2$  es el área basimétrica en m<sup>2</sup> /ha en  $t_2$  obtenida en función del  $G_1$  en  $t_1$ ,  $N_2$  representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior  $N_1$ , V el volumen en m<sup>3</sup> /ha y Hm es la altura media en m.

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke que varían en función de los distintos trabajos encontrados (Tabla 37).

Tabla 37. Ecuaciones de densidad máxima para *Pinus sylvestris*. Fuente: Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo        | Ecuaciones                                       | Fuente                           |
|-----------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima | $N_{max} = EXP(12,607 + (-1,7262) \cdot Ln(Dg))$ | Aguirre et al. (2018)            |
| Densidad máxima | $N_{max} = EXP(12,685 + (-1,7524) \cdot Ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |

donde  $N_{max}$  es el número máximo de pies por hectárea.

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Diéguez–Aranda et al. (2009) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de las densidades máximas ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 23).

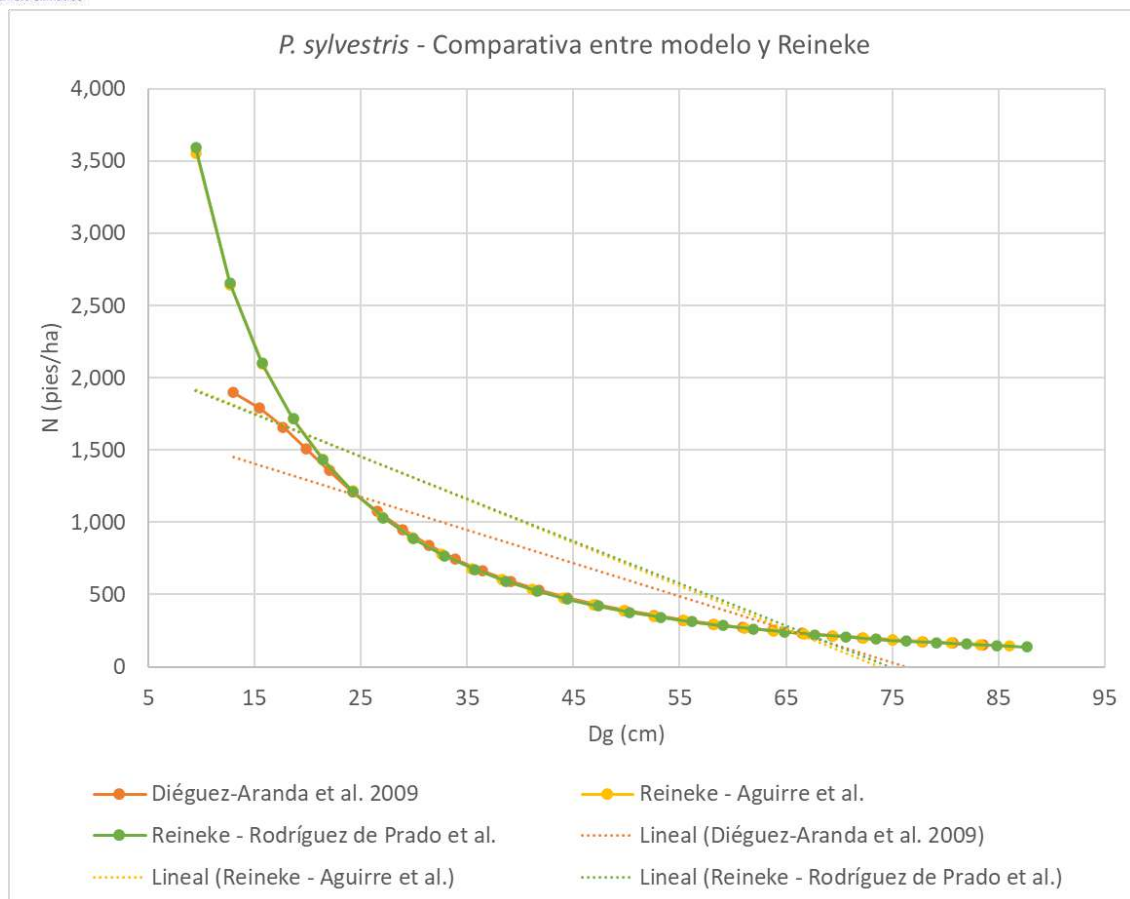


Figura 23. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por los modelos de Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 15.

A partir de la interpretación de la Figura 23, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) ofrece un valor de densidad que se ajusta muy bien a las curvas de densidad máxima de los modelos con los que se compara. Tras un breve análisis visual, no sería necesario un ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1.7262} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Aguirre et al. (2018) toma un valor de 1444.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, el SDI del modelo de crecimiento en ningún momento es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, queda confirmada la hipótesis gráfica y el modelo de crecimiento no sobreestima la capacidad del rodal para esta especie, no siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Aguirre et al. (2018) y Rodríguez de Prado et al. (2020).

Se realiza la misma comprobación aplicando la anterior fórmula y metodología para los valores definidos por Rodríguez de Prado (2020) que fija el máximo en 1146 y un exponente de 1,7524. Arrojando el mismo resultado.

Sin necesidad de reajuste, se procede a la aplicación de las funciones de entrada y de salida del modelo (Tabla 36) para el cálculo del volumen del rodal. El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 24):

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_T$ ) a partir del volumen total ( $V$ ). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 38) en combinación con Pita (1967) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 38. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                                                | Fuente                          |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                                                      | –                               |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                                                       | –                               |
| Volumen individual       | $V_u = -1,26 + 4,076 \cdot \left(\frac{Dg}{10}\right)^2 \cdot Hm - 0,001344 \cdot \left(\left(\frac{Dg}{10}\right)^2 \cdot Hm\right)^2$ | Pita (1967)                     |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                                                 | Menéndez–Miguélez et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0160 y $\beta_1$ es 0,9573.                                |                                 |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$ , donde $\beta_2$ es 1,5553 y $\beta_3$ es –0,1831                            |                                 |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,279$                                                                                                                             | Ruiz–Peinado et al. (2011)      |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,272$                                                                                                                             | SEI (2024)                      |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $V$  es el volumen del rodal en  $m^3$ /ha, BEF es el factor de expansión de biomasa,  $V_u$  es el volumen de árbol individual,  $W_u$  es la biomasa del árbol unitario,  $Dg$  es el diámetro cuadrático,  $Hm$  es la altura media en,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y  $R$  es la relación raíz–vástago.

- b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 39).

Tabla 39. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo         | Ecuación                                                               | Fuente                    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Biomasa total    | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$ | –                         |
| Biomasa de fuste | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                           | Vieilledent et al. (2018) |

| Atributo                    | Ecuación                                                                                                     | Fuente                                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,467$                                                                                           | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_C \cdot W_T = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$ , donde $\beta_2$ es 1,5553 y $\beta_3$ es -0,1831 | Menéndez-Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,279$                                                                                                  | Ruíz-Peinado et al. (2011)            |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,272$                                                                                                  | SEI (2024)                            |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $d_{(12\%)}$  es la densidad al 12 % de humedad,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en  $m^3$  /ha,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

### Pinus sylvestris - Biomasa

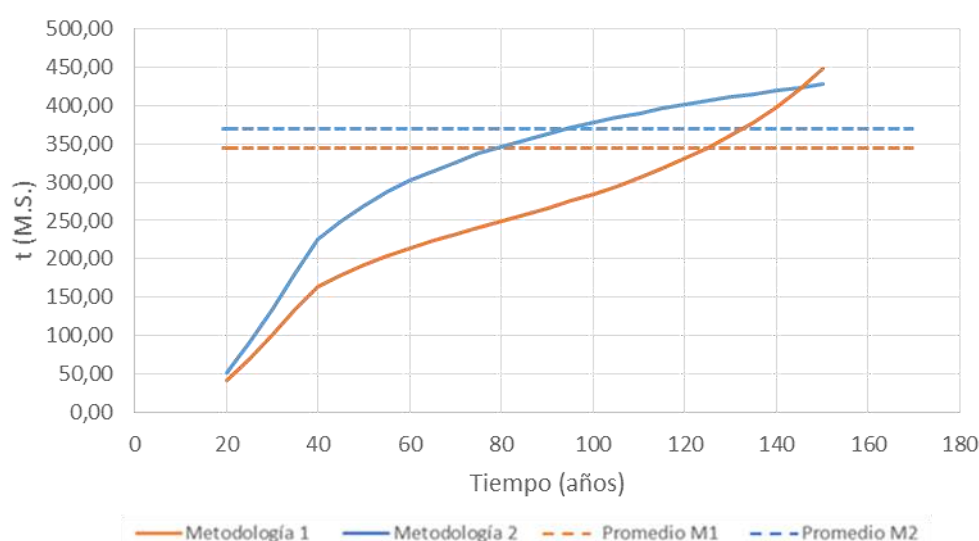


Figura 24. Evolución del volumen de la masa para *Pinus sylvestris* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 2}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (50,9 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 25; Tabla 40).

### *Pinus sylvestris* - Absorciones

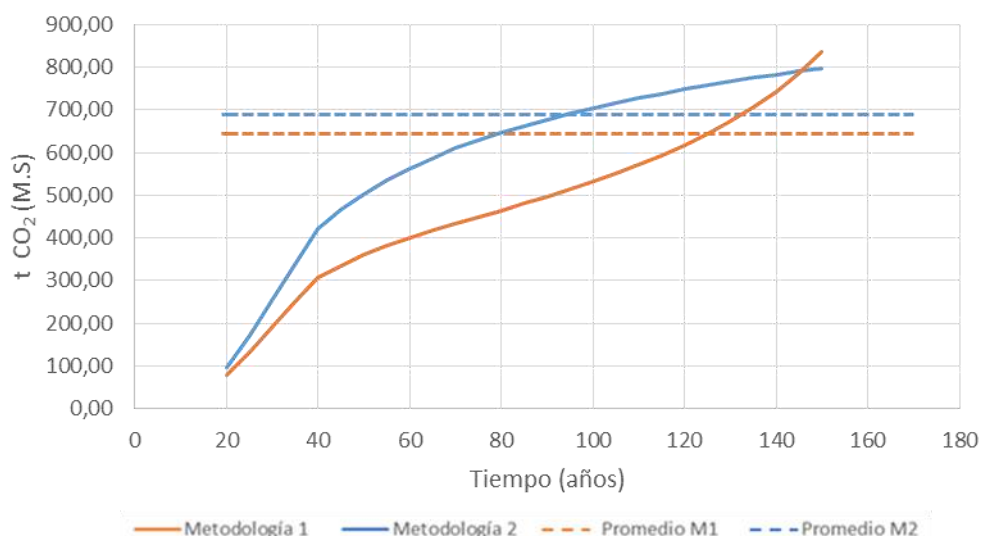


Figura 25. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Pinus sylvestris* a lo largo del turno propuesto (150 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

Tabla 40. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pinus sylvestris* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 15, los valores de densidad de Aguirre et al. (2018) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011).

| Turno: 150 años               | Diéguez-Aranda et al. (2009)<br>Modelo dinámico. |                    |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                               | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 3,55                                             | 3,35               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 4,24                                             | 4,23               |
| Absorción media anual (t)     | 6,63                                             | 6,25               |
| Absorción acumulada anual (t) | 7,92                                             | 7,89               |

#### 4.9. *Quercus pyrenaica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Quercus pyrenaica* para los casos de conversión a zonas de conservación se emplea el modelo estático desarrollado por Castaño–Santamaría (2013). Las relaciones fundamentales han sido obtenidas del inventario del Sistema Ibérico para repoblaciones forestales de esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 60 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 7, 10, 13 y 16 m (Tabla 41).

Tabla 41. Relaciones fundamentales para *Quercus pyrenaica*. El modelo es el contemplado por Castaño – Santamaría (2013), mientras que la primera relación fundamental viene dada por Adame et al. (2006). Fuente: Adame et al. (2006) y Castaño–Santamaría (2013).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ecuaciones                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Primera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                    | $H_{02} = EXP(X) \cdot t_2^{15,172-4,2126 \cdot X}$ $X = - \left( \frac{(-\ln(H_{01}) + 15,172 \cdot \ln(t'_1))}{(1 - 4,2126 \cdot \ln(t'_1))} \right)$ $t'_1 = 1 - EXP(-0,1439 \cdot t_1^{0,6711})$ |
| Segunda relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                    | –                                                                                                                                                                                                    |
| Tercera relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                    | $Dg = 14,4008 \cdot N^{-0,3024} \cdot H_{02}^{0,8473}$                                                                                                                                               |
| Cuarta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                     | $V = 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot Dg^{1,4412} \cdot H_{02}^{1,0690} \cdot N^{0,9068}$                                                                                                                    |
| Quinta relación fundamental                                                                                                                                                                                                                                                                     | –                                                                                                                                                                                                    |
| donde N es el número de pies por hectárea, H <sub>02</sub> la altura dominante en m, H <sub>01</sub> es la calidad de estación, t <sub>2</sub> es la edad en años, t <sub>1</sub> es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm y V el volumen en m <sup>3</sup> /ha. |                                                                                                                                                                                                      |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke (Tabla 42):

Tabla 42. Ecuaciones de densidad máxima para *Quercus pyrenaica*. Fuente: Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                        | Ecuaciones                                        | Fuente                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                                 | $N_{max} = EXP(12,271 + (-1,7203) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde N <sub>max</sub> es el número máximo de pies por hectárea y Dg es al diámetro cuadrático. |                                                   |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Castaño–Santamaría (2013) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de la densidad máxima ofrecida por Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo, que en este caso es constante al no tener dicha función (Figura 26).

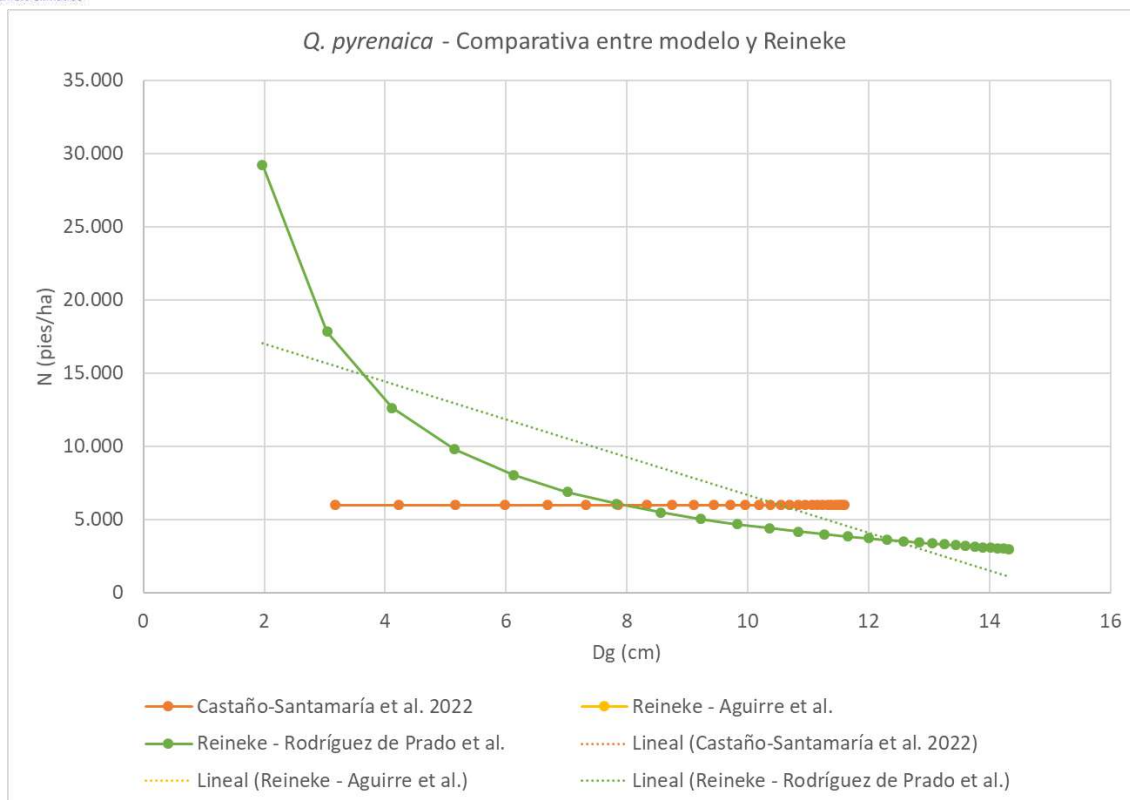


Figura 26. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Castaño–Santamaría et al. (2013) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por el modelo de Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 13.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 26, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Castaño–Santamaría et al. (2013) no ofrece un variable de densidad. En definitiva, y tras un breve análisis, resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Bravo–Oviedo et al. (2004):

$$SDI = N_{max} \cdot \left( \frac{Dg}{25} \right)^{1.7203} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Rodríguez de Prado et al. (2020) toma un valor de 840.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 50 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del para  $SDI_{max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 840 desde los 50 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de Adame et al. (2010). Para el caso de *Quercus pyrenaica*, estos datos son: 0,35 %

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,7203} \right)^{\frac{1}{1,7203}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 27):

- a) **Metodología Castaño – Santamaría (MC–S) o M2.** Se obtiene la ecuación de biomasa total ( $W_t$ ) a partir de la altura dominante ( $H_{02}$ ), densidad (N) y diámetro cuadrático (Dg) (Tabla 43).

Tabla 43. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ecuación                                                                                                          | Fuente                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Biomasa total                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $W_T \text{ (t M.S.)} = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{2,2209} \cdot H_{02}^{0,8317} \cdot N^{0,9744} \cdot (1 + R)$ | Castaño–Santamaría (2013)  |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $R = 0,353$                                                                                                       | Ruiz–Peinado et al. (2012) |
| Relación raíz–vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $R = 0,300$                                                                                                       | SEI (2024)                 |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en $m^3/ha$ , BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_C$ – $W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago. |                                                                                                                   |                            |

- b) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_t$ ) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) (Rodríguez et al., 2015) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) combinación con SEI (2024) o Ruiz–Peinado et al. (2012) (Tabla 44).

Tabla 44. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo               | Ecuación                                                  | Fuente                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Biomasa total          | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$        | –                          |
| BEF                    | $BEF = W_u / V_u$                                         | –                          |
| Volumen individual     | $V_u = 0,051 \cdot Dg^{1,867810} \cdot H_{02}^{0,989625}$ | Rodríguez et al. (2015)    |
| Biomasa árbol unitario | $W_u = 0,0074 \cdot (Dg^2 \cdot H_{02})^{1,1616}$         | Datos sin publicar         |
| Relación raíz–vástago  | $R = 0,353$                                               | Ruiz–Peinado et al. (2012) |

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ecuación    | Fuente     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| Relación raíz-vástago                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $R = 0,300$ | SEI (2024) |
| donde $W_T$ es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m <sup>3</sup> /ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, $V_u$ es el volumen de árbol individual, $W_u$ es la biomasa del árbol unitario, $D_g$ es el diámetro cuadrático, $H_m$ es la altura media en, $W_{fuste}$ es la biomasa del fuste, $W_C$ $W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago. |             |            |

### Quercus pyrenaica - Biomasa

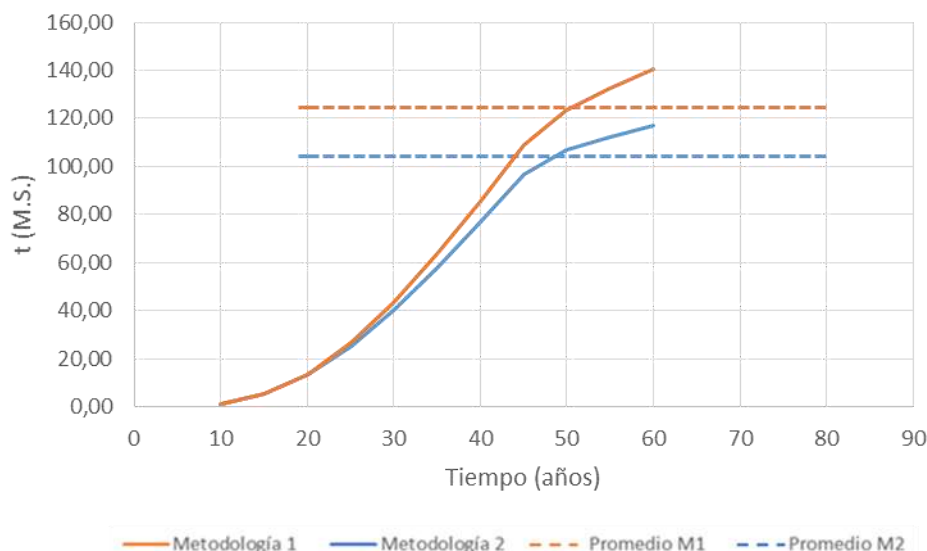


Figura 27. Evolución del volumen de la masa para *Quercus pyrenaica* a lo largo del turno propuesto (60 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz-vástago de Ruiz-Peinado et al. (2012).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (47,5 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de  $CO_2$  siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el  $CO_2$  junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 28: Tabla 45).

### Quercus pyrenaica - Absorciones

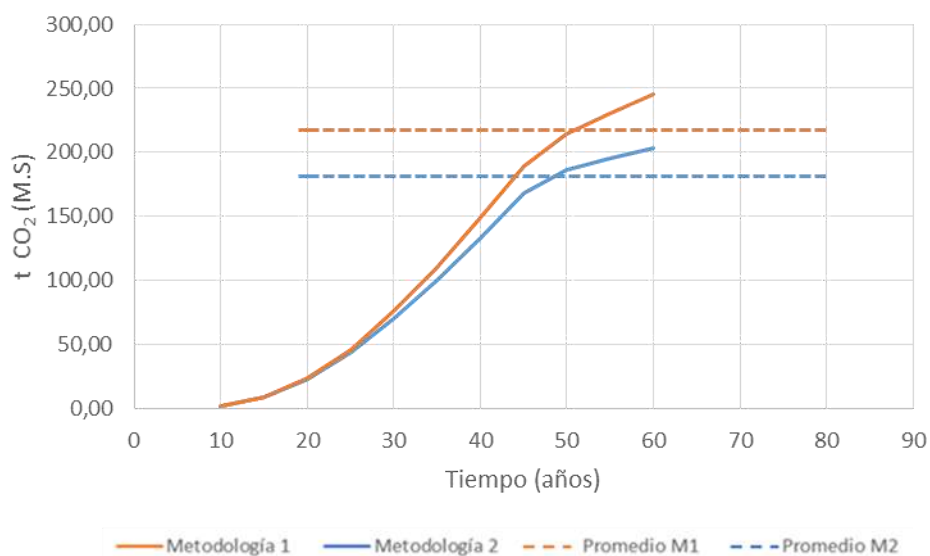


Figura 28. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Quercus pyrenaica* a lo largo del turno propuesto (60 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2012).

Tabla 45. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Quercus pyrenaica* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 13, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2012).

| Turno: 35 años                | Castaño-Santamaría (2013)<br>Modelo estático |                    |
|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|
|                               | Castaño-Santamaría (MC-S).                   | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 1,77                                         | 3,56               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 2,03                                         | 4,05               |
| Absorción media anual (t)     | 3,08                                         | 6,19               |
| Absorción acumulada anual (t) | 3,54                                         | 7,05               |

#### 4.10. *Quercus robur*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Quercus robur* para los casos de conversión a zonas de conservación se emplea el modelo dinámico desarrollado por Diéguez–Aranda et al. (2009). Las funciones han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia. En este documento, se define una edad de referencia de 60 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 8, 13, 18 y 23 m (Tabla 46).

Tabla 46. Funciones dinámicas para *Quercus robur*. Fuente: Diéguez–Aranda et al. (2009).

| Atributo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ecuaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altura dominante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $H_{02} = H_{01} \left( \frac{1 - EXP(-0,01440 \cdot t_2)}{1 - EXP(-0,01440 \cdot t_1)} \right)^{-1,049 + \frac{7,479}{X_0}}$ $X_0 = 0,5 \left( \ln(H_{01}) + 1,049 \cdot L_0 + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 1,049 \cdot L_0)^2 - 29,92 \cdot L_0} \right)$ $L_0 = \ln(1 - EXP(-0,01440 \cdot t_1))$ |
| Altura media                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $Hm = -29,49 + 0,8407 \cdot H_{02} + \frac{36,34}{N^{0,03}}$                                                                                                                                                                                                                                 |
| Función de transición del número de pies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $N_2 = (N_1 \cdot EXP(-0,01533 \cdot (t_2 - t_1)))$                                                                                                                                                                                                                                          |
| Función de inicialización del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $G = 104,8 \cdot (1 - EXP(-0,006031 \cdot t_2))^{\frac{14,62}{H_{01}} + \frac{167,1}{N_2}}$                                                                                                                                                                                                  |
| Función de transición del área basimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $G_2 = G_1^{\frac{t_1}{t_2}} \cdot EXP\left(0,8579 \cdot \ln(H_{01}) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + 0,3060 \cdot \ln(N_1) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)$                                                                                                           |
| Volumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $V = 5,030 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{1,974} \cdot H_{02}^{0,9243} \cdot N^{0,9752}$                                                                                                                                                                                                            |
| donde N es el número de pies por hectárea, H <sub>02</sub> la altura dominante en m, H <sub>01</sub> es la calidad de estación, Hm es la altura media en m, t <sub>2</sub> es la edad en años, t <sub>1</sub> es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha, G <sub>2</sub> es el área basimétrica en m <sup>2</sup> /ha en t <sub>2</sub> obtenida en función del G <sub>1</sub> en t <sub>1</sub> , N <sub>2</sub> representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N <sub>1</sub> , V el volumen en m <sup>3</sup> /ha y Hm es la altura media en m. |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer las densidades estimadas por Reineke (Tabla 47):

Tabla 47. Ecuaciones de densidad máxima para *Quercus robur*. Fuente: Rodríguez de Prado et al. (2020).

| Atributo                                                                                        | Ecuaciones                                        | Fuente                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Densidad máxima                                                                                 | $N_{max} = EXP(12,043 + (-1,6698) \cdot \ln(Dg))$ | Rodríguez de Prado et al. (2020) |
| donde N <sub>max</sub> es el número máximo de pies por hectárea y Dg es al diámetro cuadrático. |                                                   |                                  |

El segundo paso de la metodología con relación al ajuste del modelo de Diéguez–Aranda et al. (2008) con respecto a las densidades desarrolladas por Reineke es la comprobación gráfica de la densidad máxima ofrecida por Rodríguez de Prado et al. (2020) con la mortalidad natural ofrecida por el modelo (Figura 29).

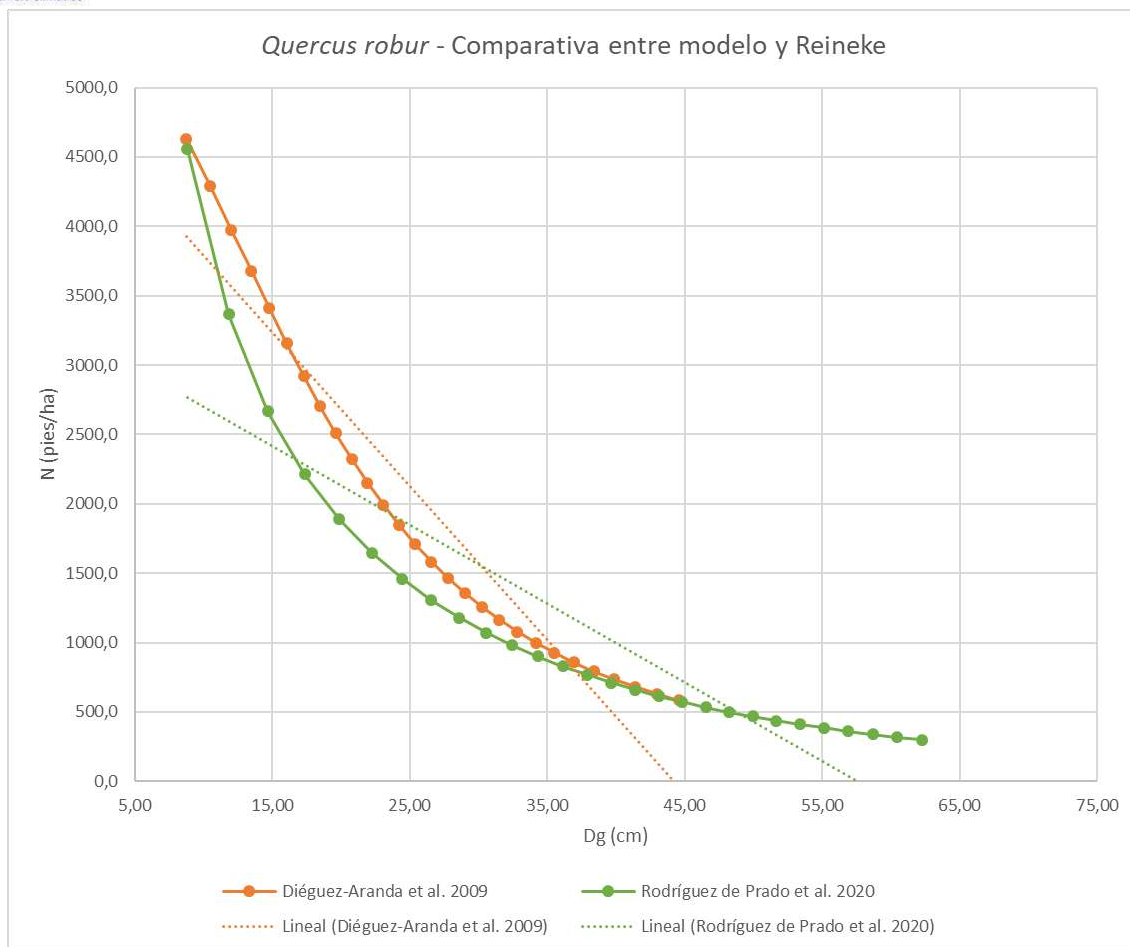


Figura 29. Comparativa del tamaño máximo–densidad entre el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2019) y los valores de densidad máxima de Reineke ofrecidos por el modelo de Rodríguez de Prado et al. (2020) para un índice de sitio 18.

A partir de la interpretación gráfica de la Figura 29, se puede apreciar que el modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) ofrece un valor de densidad muy similar a su potencial valor. En definitiva, y tras un breve análisis, resulta necesario el ajuste de la densidad del modelo hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Para una comprobación cuantitativa, se procede al cálculo del SDI para cada rango de edad calculado a partir de la densidad máxima ( $N_{max}$ ) ofrecida a partir la fórmula expuesta por Aguirre et al. (2018) y el diámetro cuadrático (Dg) obtenido del desarrollo del modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009):

$$SDI = N_{max} \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1.6698} \quad (\text{Ec. 1}),$$

De forma adicional, resulta necesario ser conocedores del  $SDI_{max}$  para estimar la capacidad máxima del rodal. Este índice según lo definido en Rodríguez de Prado et al. (2020) toma un valor de 787.

Aplicando la fórmula del SDI para todos los rangos de edad a lo largo del turno de corta, se puede afirmar que, a los 20 años de edad de la masa, el SDI del modelo de crecimiento es mayor al  $SDI_{max}$  de la especie. Así, se confirma cuantitativamente que el modelo de crecimiento sobreestima la capacidad máxima del rodal para esta especie, siendo necesario un reajuste hacia las densidades ofrecidas por Rodríguez de Prado et al. (2020).

Tras esta comprobación, la metodología aquí presentada propone la fijación del valor del para  $SDI_{\max}$  en el momento en el que el SDI del modelo es superior al  $SDI_{\max}$  de la especie. Para este caso concreto, se fija el valor de 787 desde los 20 años hasta el final del turno de corta.

En este momento, resulta evidente que las densidades predichas por el modelo no simulan de forma adecuada el autoaclareo de la masa. Para resolver este conflicto, en el presente documento se propone la obtención de una nueva “densidad observada” calculada a partir de los datos de mortalidad natural anual obtenidos de Etzold et al. (2019). Para el caso de *Quercus robur*, estos datos son: 2,1 %.

A partir del cálculo de esta nueva densidad y el SDI reajustado para el modelo, se recalcula el diámetro cuadrático, despejando la ecuación del SDI, para posteriormente obtener el área basimétrica (G) para el cálculo del volumen de la masa:

$$Dg = \left( \left( \frac{SDI}{N_{observada}} \right) \cdot 25^{1,6698} \right)^{\frac{1}{1,6698}} \quad (\text{Ec. 2}),$$

$$G = \left( \frac{\pi}{40.000} \right) \cdot Dg^2 \cdot N_{observada} \quad (\text{Ec. 3}),$$

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías (Figura 30):

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total ( $W_T$ ) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol ( $V_u$ ) y la biomasa del árbol medio ( $W_u$ ) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 48) en combinación con SEI (2024).

*Tabla 48. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.*

| Atributo                 | Ecuación                                                                                                | Fuente                          |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Biomasa total            | $W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$                                                      | –                               |
| Factor expansión biomasa | $BEF = W_u / V_u$                                                                                       | –                               |
| Volumen individual       | $V_u = 0,066964 \cdot Dg^{2,0372} \cdot Hm^{0,70403}$                                                   | Martínez–Millán et al. (1993)   |
| Biomasa árbol unitario   | $W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$                                                                 | Menéndez–Miguélez et al. (2021) |
| Biomasa de fuste         | $W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$ , donde $\beta_0$ es 0,0366 y $\beta_1$ es 0,9365 |                                 |
| Relación de copa         | $W_C \cdot W_T = 0,4268$                                                                                |                                 |
| Relación raíz–vástago    | $R = 0,536$                                                                                             | SEI (2024)                      |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en  $m^3/ha$ , BEF es el factor de expansión de biomasa,  $V_u$  es el volumen de árbol individual,  $W_u$  es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

- b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la

densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 49).

Tabla 49. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

| Atributo                    | Ecuación                                                               | Fuente                                |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biomasa total               | $W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$ | –                                     |
| Biomasa de fuste            | $W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$                           | Vieilledent et al. (2018)             |
| Densidad al 12 % de humedad | $d_{12\%} = 0,991$                                                     | Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967) |
| Relación de copa            | $W_C \cdot W_T = 0,4268$                                               | Menéndez-Miguélez et al. (2021)       |
| Relación raíz-vástago       | $R = 0,536$                                                            | SEI (2024)                            |

donde  $W_T$  es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca,  $d_{12\%}$  es la densidad al 12 % de humedad,  $W_{fuste}$  es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m<sup>3</sup>/ha,  $W_C \cdot W_T$  es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

### Quercus robur - Biomasa

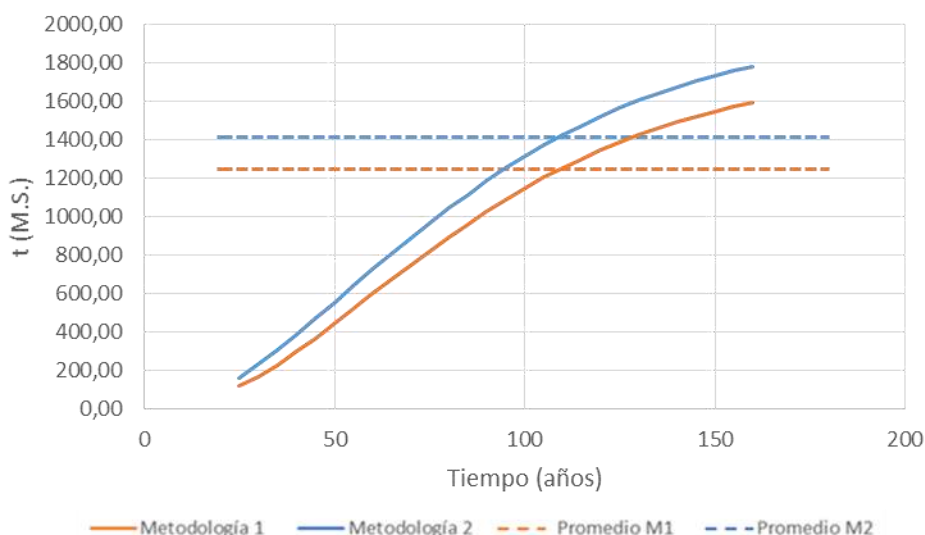


Figura 30. Evolución del volumen de la masa para Quercus robur a lo largo del turno propuesto (160 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo del volumen de la masa, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz-vástago de SEI (2024).

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde  $W_t$  es la biomasa total en toneladas,  $F_C$  es el factor de carbono (48,4 % para esta especie) (SEI, 2024),  $PM_{CO_2}$  es el peso molecular de CO<sub>2</sub> siendo 44 y  $PM_C$  es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO<sub>2</sub> junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido.

Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado (Figura 31; Tabla 50).

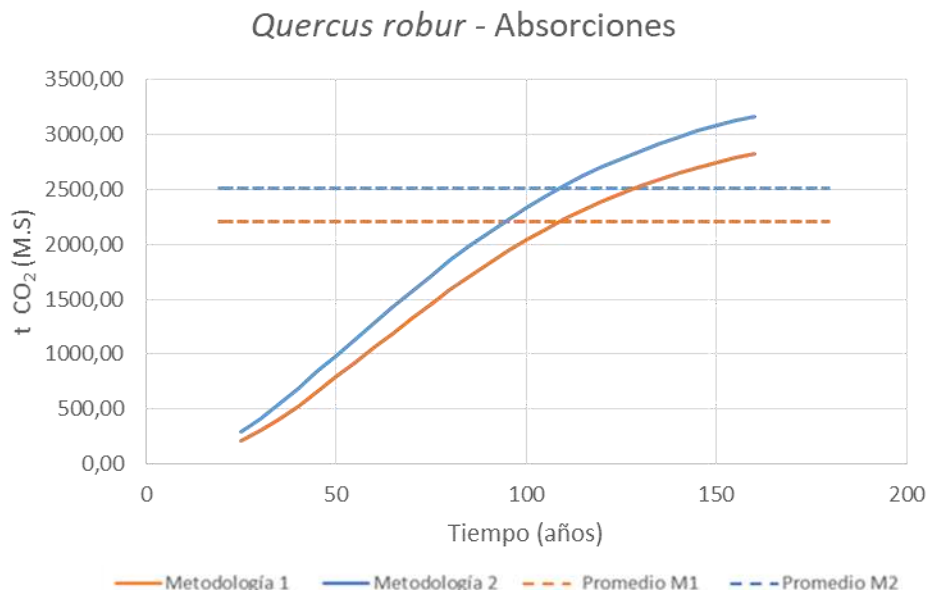


Figura 31. Evolución de las absorciones de CO<sub>2</sub> para *Quercus robur* a lo largo del turno propuesto (160 años) para las dos metodologías de cálculo de la biomasa (Metodología 1, naranja; Metodología 2, azul). Nota: para el desarrollo de las absorciones, para este ejemplo concreto se han empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de SEI (2024).

Tabla 50. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO<sub>2</sub> medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Quercus robur* a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas. Nota: para el desarrollo del modelo de este caso concreto se ha empleado el índice de sitio 18, los valores de densidad de Rodríguez de Prado et al. (2020) y el coeficiente raíz –vástago de SEI (2024).

| Turno: 160 años               | Diéguez-Aranda et al. (2009)<br>Modelo dinámico |                    |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
|                               | Metodología 1 (M1)                              | Metodología 2 (M2) |
| Biomasa media anual (t)       | 7,36                                            | 8,44               |
| Biomasa acumulada anual (t)   | 8,46                                            | 9,59               |
| Absorción media anual (t)     | 13,07                                           | 14,98              |
| Absorción acumulada anual (t) | 15,01                                           | 17,03              |

## 5. Ejemplo de uso de la aplicación Excel para *Pinus sylvestris*

Una vez detallados los modelos de crecimiento empleados junto con el empleo de la mortalidad, las metodologías de conversión de volumen a biomasa y la transformación a absorciones de CO<sub>2</sub>, por parte del equipo ICIFOR, INIA–CSIC se ha desarrollado una aplicación/calculadora Excel por la cual las personas usuarias u órganos gestores podrán poner en práctica estos modelos con las especificaciones de sus rodales, implementando una no gestión de la masa. El Excel recibe el nombre de Calculadora de absorciones *ex ante* de dióxido de carbono de las especies españolas. Conversión de zonas de aprovechamiento a zonas de conservación, donde se incluyen modelos estáticos y dinámicos.

A partir de este momento, se desarrolla un guía simple y de ejemplo para el caso concreto de *Pinus sylvestris* para el Excel. Todas las especies incluidas cuentan con el mismo formato y la misma estructura de secciones, por lo que la ejemplificación con *Pinus sylvestris* es suficiente para explicar el funcionamiento del Excel.

En primer lugar, y de forma predeterminada, al abrir la aplicación/calculadora, la primera pestaña que aparece es la de la *Portada*. En esta pestaña aparecen desarrollados los logos oficiales, el título del Excel y el contenido a modo de índice (Figura 32). La aplicación queda estructurada de forma que los modelos desarrollados para cada una de las especies aparecen en una pestaña independiente.



Figura 32. Captura de la portada de la aplicación/calculadora.

Las personas usuarias podrán navegar por la aplicación mediante la selección directa de las pestañas del Excel (situado en la parte inferior) (Figura 33) o clicando los puntos del contenido mediante la creación de un enlace directo (Figura 32).

|                |                |                    |                     |                |
|----------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|
| <b>Portada</b> | 1. Descripción | 2. Fagus sylvatica | 3. Pinus halepensis | 4. Pinus nigra |
|----------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|

Figura 33. Captura de las pestañas de la aplicación/calculadora.

De cualquiera de las formas posibles de selección de la pestaña, si la persona usuaria selecciona 1. *Datos generales del proyecto* a partir del índice de contenidos o 1. *Descripción* a partir de las pestañas inferiores, se abre acceso de la pestaña de *Descripción general* (Figura 34). Como se puede apreciar en la Figura 34, a la izquierda de la ventana aparece un índice que se mantiene para todas las pestañas del libro de Excel. Este índice se crea con el objetivo de poder navegar con mayor facilidad a lo largo de los modelos, sin necesidad de acudir a la selección manual de las pestañas de la parte inferior (Figura 33). Mediante un simple clic, el órgano gestor podrá seleccionar la especie de interés. El botón **VOLVER** ofrece un retorno hacia la portada (Figura 32). Entrando en el detalle de esta pestaña, se realiza una descripción del marco del proyecto a partir del cual se desarrolla la aplicación calculadora y unas pequeñas pinceladas del funcionamiento de la misma. Si bien, se hace una síntesis del funcionamiento de la aplicación, se recomienda la lectura del ejemplo del presente documento del uso de la aplicación para una mayor claridad en su operación.

| ÍNDICE                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Descripción general                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1. Marco del proyecto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2. Funcionamiento de la aplicación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1. Marco del proyecto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2. Funcionamiento de la aplicación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>VOLVER</b><br>1. Descripción general<br>2. Fagus sylvatica<br>3. Pinus halepensis<br>4. Pinus nigra<br>5. Pinus pinaster subsp. atlantica<br>6. Pinus pinaster subsp. mesogeensis<br>7. Pinus pinus<br>8. Pinus radiata<br>9. Pinus sylvestris<br>10. Quercus pyrenaica<br>11. Quercus robur | <p>En el marco del sector forestal se ha despertado un alto interés por la generación de créditos ligados a proyectos de absorción por forestación, reforestación o restauración post incendios. Estos proyectos se fundamentan en la capacidad de fijación de carbono (C) atmosférico por parte de los nuevos bosques y terrenos forestales, generados de manera artificial en antiguos terrenos agrícolas, terrenos forestales yermos o bosques degradados. De manera simultánea al auge de estos proyectos, surge la necesidad de desarrollar nuevos proyectos de absorción basados en la modificación de la gestión forestal actualmente aplicada en bosques ya establecidos, al objeto de optimizar la capacidad de fijación de C de los mismos. La implementación de estos nuevos proyectos de absorción por gestión forestal mejorada permitirá ampliar y mejorar los sistemas voluntarios de registro de huella de carbono existentes.</p> <p>De la mano del proyecto ECO2FOR, en el presente documento, se presentan una serie de calculadoras para poder determinar el aumento en los almacenes de C asociados a los nuevos proyectos de absorción forestal para las principales masas forestales de nuestro país. En estos nuevos proyectos, las prácticas de gestión forestal van más allá de la regulación de la espesura y pueden resultar en un aumento de la capacidad de absorción de los bosques por encima de sus niveles de base. En concreto, la metodología aquí propuesta queda referida para el cálculo de los stocks de carbono asociados a los proyectos de gestión forestal mejorada basados en la <b>conversión de zonas de aprovechamiento forestal a zonas de conservación</b>. Esta conversión se produce en sistemas forestales sometidos a un aprovechamiento forestal</p> | <p>A partir del desarrollo de la presente aplicación/calculadora las personas usuarias u órganos gestores podrán modelizar el crecimiento dinámico de sus masas a partir de sus especificaciones concretas. La calculadora de absorciones ex ante de carbono de las especies forestales españolas para los modelos de crecimiento modeliza en último término la biomasa de las masas forestales y su transformación a absorciones de CO<sub>2</sub>. De forma genérica, se han empleado dos metodologías de conversión del volumen del rodal a biomasa: el uso de factores de expansión de la biomasa (Metodología 1   M1) o la aplicación de un factor de densidad de la madera con un contenido de humedad del 12 % tabulado por especies (Metodología 2   M2). La transformación de la biomasa en absorciones de CO<sub>2</sub> se realiza empleando la metodología propuesta por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI).</p> <p>La calculadora se encuentra diseñada para las principales masas españolas y cada pestaña de especie (seleccionables mediante un simple clic en la parte izquierda de la aplicación   Índice) se estructura de la siguiente manera:</p> <p><b>1. Modelo y datos de partida:</b> en esta sección se muestra el modelo de crecimiento estático o dinámico empleado para la modelización de cada especie concreta. El órgano podrá modificar los datos de índice de sitio (edad de referencia de la masa y altura dominante) edad inicial, turno base y turno alargamiento, la densidad de partida, el peso de la clara y el valor de R (coeficiente raíz-vástago). Existe la opción de incluir la mortalidad natural esperada de la masa. En la casilla inmediatamente inferior deberá introducirse la edad a partir de la cual se aplicará dicha mortalidad. En este sentido, la fila "Ecuación de Reineke" permite seleccionar el modelo empleado para el cálculo de la misma Aguirre et al. (2018) o Rodríguez de Prado et al. (2020) a su lado aparece el valor de SDI<sub>base</sub>. Estos datos deberían ser incluidos a partir de inventario. Si bien no se disponen de estos datos, se podrían dejar los valores propuestos e iniciales para hacer una primera estimación de las absorciones generadas. Modificando los valores anteriormente mencionados, de forma automática, se verán modificados los valores de biomasa y absorción. El único procedimiento que hay que realizar de forma manual es la aplicación del régimen de claras (sección 2).</p> <p><b>2. Silvicultura propuesta:</b> en esta sección se ofrece una especie de tabla de producción en el que se incluye también la biomasa (BM) y las absorciones CO<sub>2</sub> de cada una de las metodologías propuestas a</p> |

Figura 34. Captura de la Descripción general.

Una vez clicada la opción 9. *Pinus sylvestris* aparecen los detalles que ofrecen los valores de biomasa y absorciones de CO<sub>2</sub>. La pestaña de las especies aparece siempre estructura en las siguientes secciones o bloques: (1) *Modelo y datos de partida* (Figura 35), (2) *Silvicultura propuesta* (Figura 36), (3) *Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO<sub>2</sub>* (Figura 37), (4) *Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO<sub>2</sub>* (Figura 38) y (5) *Esquema de claras* (Figura 39).

La sección fundamental para el desarrollo adecuado de los modelos es la sección 1. *Modelo y datos de partida* (Figura 35). Para el caso concreto de *Pinus sylvestris*, aparece el modelo de crecimiento desarrollado para la modelización, Diéguez-Aranda et al. (2009).

Los siguientes datos de esta sección (altura, edad, turno, densidad, intensidad de corta) también son modificables por el órgano gestor. Se recomienda que estos datos sean introducidos a partir de inventario para asegurar una más ajustada modelización del crecimiento de la masa. Existe la opción de incluir la mortalidad natural esperada de la masa. En función de la versión de Excel empleada, esta opción aparece como un botón seleccionable o como es en este caso con un texto “FALSO”. Si la persona usuaria desea modelizar esta mortalidad, basta con modificar el texto manualmente a “VERDADERO”. En la casilla inmediatamente inferior deberá introducirse la edad a partir de la cual se aplicará dicha mortalidad. En este sentido, la fila “Ecuación de Reineke” permite seleccionar el modelo empleado para el cálculo de la misma Aguirre et al. (2018) o Rodríguez de Prado et al. (2020) a su lado aparece el valor de  $SDI_{máx}$  que en este ejemplo se sitúa en 1297 y 1146, respectivamente.

También, como opción desplegable aparece el valor de R (coeficiente raíz–vástago). En el caso de que las usuarias no cuenten con datos de inventario, podrán usar los valores que se ofrecen de forma predeterminada, obtenidos estos por una combinación de las especificaciones del modelo con el Compendio de silvicultura de España (Serrada et al., 2008).

**ÍNDICE**

[VOLVER](#)

1. Descripción general
2. *Fagus sylvatica*
3. *Pinus halepensis*
4. *Pinus nigra*
5. *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*
6. *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*
7. *Pinus pinea*
8. *Pinus radiata*
9. *Pinus sylvestris*
10. *Quercus pyrenaica*
11. *Quercus robur*



1. Modelo y datos de partida

|                     |                              |         |
|---------------------|------------------------------|---------|
| <b>Modelo</b>       | Diéguez-Aranda et al. (2009) |         |
| Altura dominante    | 15                           | m       |
| Edad de la masa     | 40                           | años    |
| Edad inicial        | 20                           | años    |
| Turno (base)        | 150                          | años    |
| Turno (alternativo) | 150                          | años    |
| Intervalo           | 5                            | años    |
| Densidad inicial    | 2000                         | pies/ha |
| Extracción claras   | 60                           | %       |
| Mortalidad natural  | VERDADERO                    |         |
|                     | 45                           | años    |
| Ecuación Reineke    | Aguirre et al. (2018)        | 1297    |
| Régimen de claras   | Manual                       |         |
| Valor de R          | 0,279                        |         |

Figura 35. Captura de la sección primera correspondiente a Modelo y datos de partida para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Como se aprecia en la Figura 36, el régimen de claras deberá ser introducido de forma manual. De forma predeterminada, la aplicación/calculadora ofrece un esquema de silvicultura extraído generalmente del Compendio (Serrada et al., 2008). Esta opción puede servir como orientación para los casos en los que los particulares no tengan un esquema de claras definido. La persona usuaria deberá introducir la densidad o área basimétrica objetivo a conseguir tras la aplicación de las claras en el año deseado.

La novedad respecto de dicha aplicación es la posibilidad, por parte del órgano gestor, de incluir un régimen de claras y establecer, a partir de una edad concreta, la mortalidad natural de la especie. En este sentido, cabe destacar, la posibilidad de estudiar el cambio de una masa gestionada a una masa de no gestión o de conservación, permitiendo, incluso, la opción de establecer clareos de saneamiento dentro de la fase de mortalidad natural. En cualquiera de los casos, si las claras ya están definidas por el órgano gestor, las claras pueden ser introducidas en la aplicación. Para la introducción manual del

esquema de claras, previamente introducidos los datos de partida de la sección 1, el órgano gestor deberá prestar atención a la sección segunda *Selvicultura propuesta*, en concreto a la parte del *Régimen* (Figura 36). Es importante que estos datos también sean introducidos en la segunda tabla de esta sección (correspondiente al turno alternativo) para poder obtener los valores de biomasa y absorciones. El esquema de claras definido o la no gestión se expone gráficamente y de forma automática en la sección quinta *Esquema de claras* (Figura 39).

Entrando en detalle de la sección segunda (Figura 36), se ofrece una especie de tabla de producción en el que se pueden observar los valores de altura dominante, densidad, diámetro cuadrático, área basimétrica, volumen y valores de biomasa y absorciones para las dos metodologías conversión y rango de edad. Como se ha comentado con anterioridad, existen dos tablas de producción, una para el turno base y otra para el turno alternativo.

| 2. Selvicultura propuesta |   |      |      |       |       |       |         |        |        |        |         |
|---------------------------|---|------|------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|---------|
| Régimen                   |   | Masa |      |       |       |       |         | M1     | M2     | M1     | M2      |
| Densidad                  | G | Edad | N    | Hm    | Dg    | G     | V       | Wt     | Wt     | CO2    | CO2     |
|                           |   | 20   | 2000 | 6,14  | 10,07 | 15,93 | 55,43   | 34,18  | 52,60  | 63,79  | 98,16   |
|                           |   | 25   | 2000 | 8,10  | 12,69 | 25,30 | 108,59  | 64,35  | 92,30  | 120,11 | 172,26  |
|                           |   | 30   | 2000 | 9,99  | 14,64 | 33,68 | 170,25  | 96,65  | 136,22 | 180,38 | 254,23  |
|                           |   | 35   | 2000 | 11,79 | 16,12 | 40,81 | 235,40  | 128,98 | 181,24 | 240,71 | 338,26  |
|                           |   | 40   | 2000 | 13,50 | 17,26 | 46,78 | 300,94  | 160,28 | 225,62 | 299,14 | 421,08  |
|                           |   | 45   | 1706 | 15,10 | 19,66 | 51,77 | 365,10  | 186,82 | 264,70 | 348,67 | 494,03  |
|                           |   | 50   | 1455 | 16,62 | 22,13 | 55,96 | 426,88  | 210,64 | 301,20 | 393,12 | 562,14  |
|                           |   | 55   | 1244 | 18,04 | 24,67 | 59,50 | 485,77  | 231,92 | 335,12 | 432,83 | 625,45  |
|                           |   | 60   | 1070 | 19,37 | 27,27 | 62,52 | 541,57  | 250,88 | 366,59 | 468,23 | 684,17  |
|                           |   | 65   | 926  | 20,62 | 29,92 | 65,10 | 594,22  | 267,76 | 395,75 | 499,72 | 738,61  |
|                           |   | 70   | 806  | 21,79 | 32,61 | 67,34 | 643,79  | 282,74 | 422,80 | 527,68 | 789,08  |
|                           |   | 75   | 707  | 22,90 | 35,32 | 69,29 | 690,40  | 296,01 | 447,89 | 552,44 | 835,91  |
|                           |   | 80   | 624  | 23,93 | 38,06 | 71,00 | 734,20  | 307,72 | 471,19 | 574,30 | 879,40  |
|                           |   | 85   | 554  | 24,90 | 40,82 | 72,50 | 775,35  | 318,01 | 492,85 | 593,52 | 919,83  |
|                           |   | 90   | 495  | 25,81 | 43,59 | 73,84 | 814,03  | 327,01 | 513,01 | 610,31 | 957,46  |
|                           |   | 95   | 444  | 26,67 | 46,38 | 75,03 | 850,39  | 334,83 | 531,80 | 624,90 | 992,52  |
|                           |   | 100  | 401  | 27,48 | 49,18 | 76,10 | 884,61  | 341,55 | 549,34 | 637,45 | 1025,25 |
|                           |   | 105  | 363  | 28,24 | 51,99 | 77,06 | 916,82  | 347,28 | 565,72 | 648,14 | 1055,82 |
|                           |   | 110  | 330  | 28,96 | 54,81 | 77,92 | 947,18  | 352,09 | 581,04 | 657,11 | 1084,42 |
|                           |   | 115  | 302  | 29,64 | 57,64 | 78,71 | 975,81  | 356,04 | 595,40 | 664,49 | 1111,22 |
|                           |   | 120  | 277  | 30,29 | 60,48 | 79,43 | 1002,84 | 359,22 | 608,87 | 670,41 | 1136,35 |
|                           |   | 125  | 254  | 30,89 | 63,32 | 80,08 | 1028,38 | 361,66 | 621,51 | 674,98 | 1159,94 |
|                           |   | 130  | 235  | 31,47 | 66,16 | 80,69 | 1052,54 | 363,44 | 633,40 | 678,31 | 1182,13 |
|                           |   | 135  | 217  | 32,02 | 69,01 | 81,24 | 1075,41 | 364,61 | 644,59 | 680,48 | 1203,02 |
|                           |   | 140  | 202  | 32,54 | 71,87 | 81,75 | 1097,09 | 365,20 | 655,13 | 681,59 | 1222,70 |
|                           |   | 145  | 187  | 33,03 | 74,73 | 82,22 | 1117,66 | 365,27 | 665,08 | 681,72 | 1241,26 |
|                           |   | 150  | 175  | 33,50 | 77,59 | 82,66 | 1137,18 | 364,86 | 674,48 | 680,95 | 1258,80 |

Figura 36. Captura de la sección segunda correspondiente a *Selvicultura propuesta* para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Una vez introducidos los datos de partida y el esquema de claras, de forma automática se ofrecen los resultados numéricos y gráficos para la biomasa y absorciones de CO<sub>2</sub> para las dos metodologías de conversión propuestas y los dos turnos que se empleen. Los resultados numéricos en toneladas de biomasa y CO<sub>2</sub> tanto para valores anualizados como sobre el total del turno en la sección tercera *Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO<sub>2</sub>* (Figura 37). Por último, los resultados gráficos se

desarrollan en la sección cuarta Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO<sub>2</sub> (Figura 38).

| 3. Tablas cuantificación en toneladas para biomasa y CO <sub>2</sub> |               |                   |                       |                           |       |             |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|-------|-------------|
| Metodología                                                          | Biomasa media | Biomasa acumulada | CO <sub>2</sub> medio | CO <sub>2</sub> acumulado | Turno |             |
| M1                                                                   | 2,11          | 2,43              | 3,94                  | 4,54                      | 150   | Base        |
|                                                                      | 2,11          | 2,43              | 3,94                  | 4,54                      | 150   | Alternativo |
| M2                                                                   | 3,67          | 4,50              | 6,85                  | 8,39                      | 150   | Base        |
|                                                                      | 3,67          | 4,50              | 6,85                  | 8,39                      | 150   | Alternativo |

*Nota:* Valores anualizados

| Metodología | Biomasa media | Biomasa acumulada | CO <sub>2</sub> medio | CO <sub>2</sub> acumulado | Turno |             |
|-------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|-------|-------------|
| M1          | 316,64        | 364,86            | 590,95                | 680,95                    | 150   | Base        |
|             | 316,64        | 364,86            | 590,95                | 680,95                    | 150   | Alternativo |
| M2          | 550,77        | 674,48            | 1027,92               | 1258,80                   | 150   | Base        |
|             | 550,77        | 674,48            | 1027,92               | 1258,80                   | 150   | Alternativo |

*Nota:* Valores sobre el total del turno

Figura 37. Captura de la sección tercera correspondiente a Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO<sub>2</sub> para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Esta aplicación/calculadora podrá estar disponible y accesible en la página bien del INIA ([enlace](#)) o en la futura página web del ICIFOR. Su destino se encuentra aún por definir.

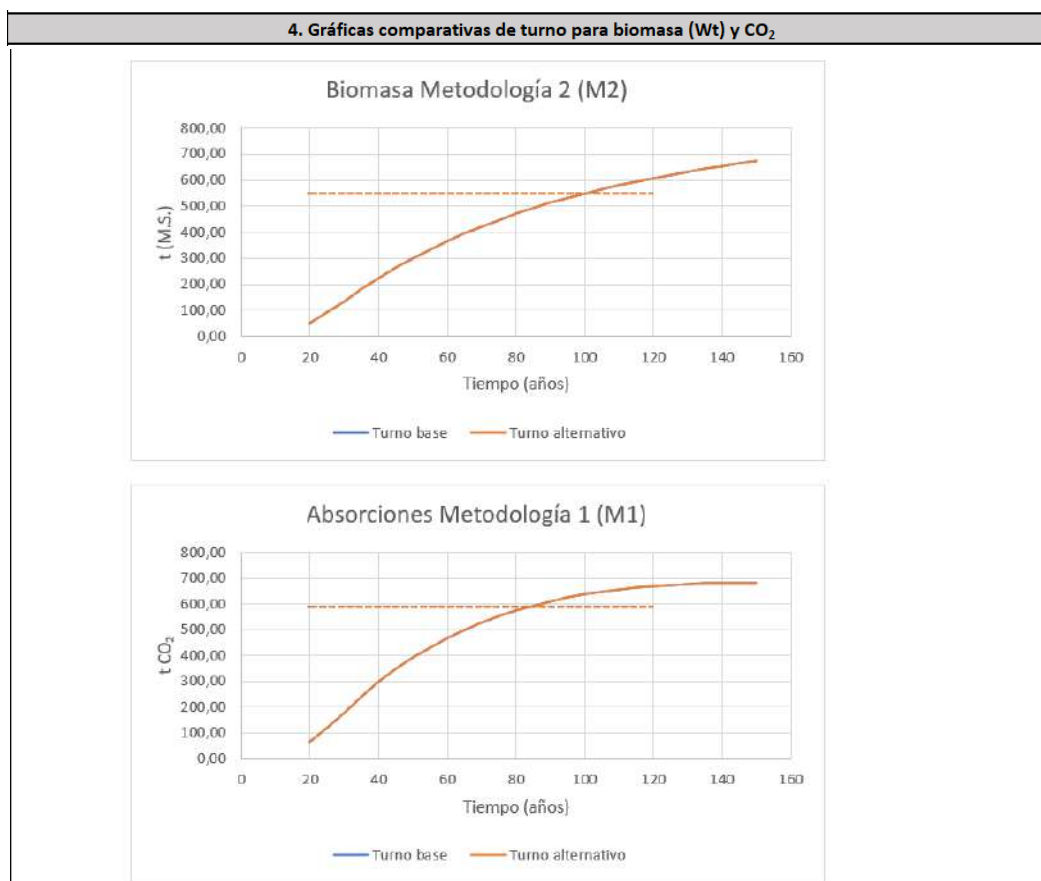


Figura 38. Captura de la sección cuarta correspondiente a Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO<sub>2</sub> para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

### 5. Esquema de claras

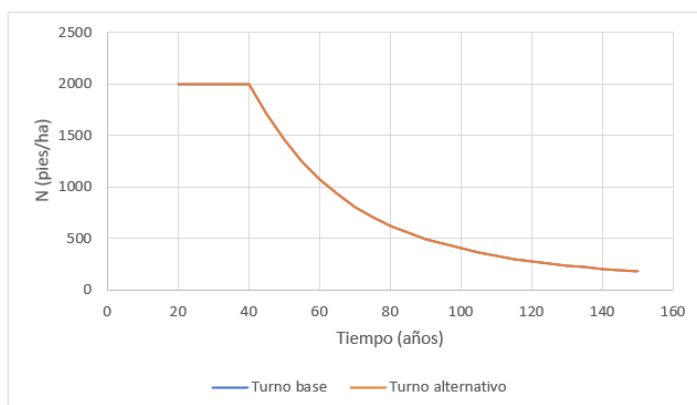


Figura 39. Captura de la sección quinta correspondiente a Esquema de claras para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.



**eco2for**

Mejora de la contribución del  
sector forestal a la lucha contra  
el cambio climático

## **6. Agradecimientos**

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.

## 7. Referencias

- Adame, P., Cañellas, I., Roig, S. y del Río, M. 2006. Modelling dominant height growth and site index curves for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Annals of Forest Science*, 63, 929–940.
- Adame, P.; del Río, M. y Cañellas, I. 2010. Modeling individual–tree mortality in Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) stands. *Forest Sciences*. 67(810)0
- Aguirre, A., del Río, M., y Condés, S. 2018. Intra–and inter–specific variation of the maximum size–density relationship along an aridity gradient in Iberian pinewoods. *Forest Ecology and Management*, 411, 90–100.
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., y Cavard, X. 2021. Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 245–266.
- Bastin J. F., Finegold, Y., García, C., MolliconE, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., y Crowther, T. W. 2019. The global tree restoration potential. *Science*, 365 (80), 76–79.
- Bravo, F., Alvarez–González, J. G., del Río, M., Barrio, M., Bonet, J. A., Bravo–Oviedo, A., Calama, R., Castedo–Dorado, F., Crecente–Campo, F., Condes, S., Diéguez–Aranda, U., González–Martínez, S. C., Lizarralde, I., Nanos, N., Madrigal, A., Martínez–Millán, F. J., Montero, G., Ordoñez, C., Palahl M., Pique, M.; Rodríguez, F., Rodríguez–Soalleiro, R., Rojo, A., Ruíz–Peinado, R., Sánchez–González, M., Trasobares, A., y Vázquez–Pique, J. 2012. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *Forest Systems*, 20 (2).
- Bravo–Oviedo, A., del Río, M., y Montero, G. 2004. Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *Forest Ecology and Management*, 201 (2–3), 187–197.
- Calama, R., Cañadas, N., y Monter, G. 2003. Inter–regional variability in site index models for even–aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science*, 60, 259–269.
- Calama, R., Sánchez–González, M., y Montero, G. (2007). Management oriented growth models for multifunctional Mediterranean forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). *EFI proceedings*, 56, 57–70.
- Castaño–Santamaría, J., Barrio–Anta, M., y Álvarez–Álvarez, P. 2013. Elaboración de diagramas de manejo de densidad a escala regional para masas de *Quercus pyrenaica* Willd. en el Noroeste de España. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales. *6 Congreso Forestal Español*. Vitoria: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Crecente–Campo, F.; Marshall, P. y Rodríguez–Soalleiro, R. 2009. Modeling non–catastrophic individual–tree mortality for *Pinus radiata* plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 257, 1542–1550.

- del Río, M. 1999. *Régimen de claras y modelo de producción para Pinus sylvestris L. en los Sistemas Central e Ibérico*. Tesis doctoral. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- del Río, M., González, D., Calama, R., Cañellas, I., Guijarro, M., Sixto, H., Oliveira, N., Aldea, J., Bachiller, Ángel, Carrillo, C., de la Cruz, A. C., González, D., de la Iglesia, J., Fuertes, A., Hernando, C., López-Senespleda, E., Madrigal, G., Madrigal, J., Martín-Benito, D., Montes, F., Moreno-Fernández, D., Rodríguez-Alonso, J., Ruiz-Peinado, R., Viscasillas, E., y Pardos, M. 2025. La Red de Parcelas Permanentes del ICIFOR-INIA: información para una gestión forestal sostenible ante el cambio global. *Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales*, 50(1), 111–138.
- del Río, M., López, E., y Montero, G. 2006. *Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. en Castilla y León*. Castilla y León: Consejería de Medio Ambiente.
- Diéguez-Aranda, U., Rojo-Alboreca A., Castedo-Dorado F., Álvarez-González, J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., González-González, J. M., Pérez Cruzado, C., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C. A., Balboa-Murias, M. A., Gorgoso-Varela, J. J., y Sánchez-Rodríguez, F. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Lugo: Universidad de Santiago de Compostela.
- ECO2FOR. 2024. *Qué es eco2for*. [En línea] Disponible en: <<https://eco2for.com/que-es-eco2for/>> [consulta: 15 de enero de 2025].
- Etzold S., Ziemińska K., Rohner B., Bottero A., Bose A. K., Ruehr N. K., Zingg A. y Rigling A. 2019. One Century of Forest Monitoring Data in Switzerland Reveals Species and Site-Specific Trends of Climate-Induced Tree Mortality. *Front. Plant Sci.* 10:307, 19.
- Gutiérrez Oliva, A., y Plaza Pulgar, D. 1967. *Características físico-mecánicas de las maderas españolas*. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE). Ministerio de Agricultura.
- HAZI Fundazioa. *Informe "Ecuaciones de cubicación para pino radiata en el País Vasco"*. Vitoria: HAZI.
- Madrigal, A., Álvarez-González, J. G., Rodríguez-Soalleiro, R., y Rojo, A. 1999. *Tablas de producción para los montes españoles*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Martínez-Millán, J., Ara, P., y González-Doncel, I. 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables: estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables españolas. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 2 (2), 211–228.
- Menéndez-Miguélez, 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).

- MITECO. 2021. *Fondo de Carbono FES-CO2. Proyectos Clima*. [En línea] Disponible en: <<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/fondo-carbono/proyectos-clima/que-es-un-proyecto-clima.html>> [consulta: 15 de enero de 2025].
- Montero, G, Ruíz-Peinado, R., y Muñoz, M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles*. Madrid: INIA.
- Montero, G., Cañellas, I., y Ruíz-Peinado, R. 2001. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*, 10 (1), 179–201.
- Mora-Martínez, J. V., del Río, M., y Bravo-Oviedo, J. A. 2012. Variación regional de la producción en volumen y área basimétrica para "*Pinus Nigra*" Arn. en masas españolas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (34), 177–183.
- Núñez Manso, Y., Ramos, R., Pardos, M y Calama, R. (2025). Herramientas de estimación de carbono en el marco de proyectos de absorción de gestión forestal mejorada: alargamiento de turno. Versión 1. ICIFOR, INIA-CSIC.
- Pita, P.A. 1967. *Tablas de cubicación por diámetros normales y alturas totales. P. silvestris – P. halepensis – P. laricio – P. pinea – E. globulus-Norte – E. globulus-Sur – E. camaldulensis*. Madrid: Ministerio de Agricultura, IFIE.
- Puettmann, K. J., Hann, D. W., y Hibbs, D. E. 1993. Evaluation of the size-density relationships for pure red alder and Douglas-fir stands. *Forest Science*, 39(1), 7–27.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand density index for even aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46(7), 627–638.
- Rodríguez de Prado, D., San Martín, R., Bravo, F., y de Aza, C. H. 2020. Potential climatic influence on maximum stand carrying capacity for 15 Mediterranean coniferous and broadleaf species. *Forest Ecology and Management*, 460, 117824.
- Rodríguez, F., Lizarralde, I., y Bravo, F. 2015. Comparison of stem taper equations for eight major tree species in the Spanish Plateau. *Forest Systems*, 24 (3), 2.
- Rodríguez-Soalleiro, R. 1995. *Crecimiento y producción de masas forestales regulares de Pinus pinaster Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ruíz-Peinado, R., del Río, M., y Montero, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20 (1), 176–188.
- Ruíz-Peinado, R., Montero, G. y del Río, M. 2012. Biomass models to estimate carbón stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21 (1), 42–54.
- Sánchez, F., Rodríguez, R., Rojo, A., Álvarez, J. G., López, C., Gorgoso, J. Y., y Castedo, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigaciones Agrarias: Sistemas de Recursos Forestales*, 12 (2), 65 – 83.

Serrada, R., Montero, G. y Reque, J. A. 2008. *Compendio de Selvicultura Aplicada de España*. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria y Ministerio de Ciencia e Innovación.

Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI). 2024. *Metodologías de estimación de emisiones. Cambio en las existencias de carbono de la biomasa viva en las tierras forestales que permanecen como tales*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Tang, S., Meng, C. H., Meng, F. R., y Wang, Y. H. 1994. A growth and self–thinning model for pure even–age stands: theory and applications. *Forest Ecology and Management*, 70(1–3), 67–73.

Vanclay, J. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield*. Wallingford: CAB International.

Vieilledent, G., F. J. Fischer, J. Chave, D. Guibal, P. Langbour, y Gérard. J. 2018. New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *American Journal of Botany*, 105 (10), 1653–1661.