



2025 | 16-20
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1243

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Herramientas de Estimación de Carbono en el Marco de Proyectos de Absorción de Gestión Forestal Mejorada: Alargamiento de Turno

NÚÑEZ MANSO, Y. (1); RAMOS, R. (1); RUIZ-PEINADO, R. (1); PARDOS, M. (1)
y CALAMA, R. (1)

(1) Departamento de Dinámica y Gestión Forestal. Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR) (INIA-CSIC). Carretera A Coruña, km 7.5, 28040 Madrid, España.

Resumen

La capacidad de absorción de carbono de los bosques puede mejorarse mediante una gestión forestal mejorada (GFM). La GFM se orienta a incrementar la capacidad de captura de C atmosférico, adaptando los bosques para hacerlos más resilientes, mientras que asegura la provisión de servicios ecosistémicos. Actualmente, se han propuesto en España diferentes alternativas de gestión forestal, como el alargamiento del turno de corta, que van más allá de la regulación de la espesura y que pueden resultar en una mejora de la capacidad de absorción por encima de la línea base. La extensión del turno afectará directamente al stock de C en biomasa, *litter* y necromasa, esperándose una mayor cantidad de C capturado en biomasa en pie y en productos con mayor vida útil. El objetivo es desarrollar una herramienta de cálculo para estimar el incremento de los stocks de C de los bosques, asociado al alargamiento del turno. Para simular el alargamiento del turno se emplean relaciones fundamentales incluidas en tablas de producción y modelos preexistentes para las principales especies y formaciones forestales identificadas por el MITECO.

Palabras clave

Cuantificación y valoración de CO₂, calculadora de carbono, extensión del turno, IFN, red de parcelas permanentes ICIFOR-INIA, rodales extramaduros.

1. Introducción

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 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, ECO₂FOR”, (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 carbono (C) asociados a estos nuevos proyectos. En España, existen numerosos documentos que reflejan la silvicultura estándar propuesta para las distintas especies y formaciones forestales como el Compendio de Silvicultura 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. Estas prácticas son:

- (1) Mejora de la productividad de los sistemas forestales. En sistemas forestales que presentan densidades defectivas, estancamiento del crecimiento, arbolado envejecido y poco vigoroso. (por ejemplo, dehesas no regeneradas de *Quercus sp.* o pinares mediterráneos con decaimiento y espesuras defectivas) se propone la realización de plantaciones de densificación y enriquecimiento, al objeto de alcanzar la espesura completa y aumentar la capacidad de fijación de CO₂ (PAQUETTE ET AL., 2009).
- (2) Alargamiento del turno de corta. La extensión del ciclo productivo y alargamiento del turno de corta tiene distintos efectos sobre los stocks de C en biomasa, *litter* y necromasa. En general, se espera que el alargamiento del turno implique una mayor cantidad de C capturado en la biomasa en pie y en productos con mayor vida útil (LISKI ET AL., 2001).
- (3) Conversión de zonas de aprovechamiento forestal a zonas de conservación. 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 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, una estructura más cercana a la de un bosque maduro que pueda suponer un incremento en las existencias medias de C (SHARMA ET AL., 2013).

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 el alargamiento de turno. El alargamiento del turno supone una mejora en los stocks de carbono por un mayor almacenamiento medio en pie, así como la obtención de productos de madera con mayor vida útil (LISKI ET AL., 2001), aunque el efecto depende de la especie. 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 (estáticos y dinámicos) actualmente existentes en España (BRAVO ET AL., 2012) que permiten simular el desarrollo y proyección en el tiempo del volumen del rodal bajo una gestión dada y un turno determinado. Las salidas de estos modelos dadas en volumen, son posteriormente transformadas a biomasa y finalmente convertidas en absorciones generadas de CO₂ atmosférico.

En este sentido, para una mayor ejemplificación de la metodología propuesta respecto al alargamiento de turno y el cálculo de la biomasa y absorciones generadas de CO₂ consecuencia de este, se ha optado en este documento por exponer las metodologías correspondientes a *Pinus pinea* y *Pinus pinaster mesogensis*. La elección de estas especies de pino se debe principalmente a que son especies empleadas históricamente por las poblaciones humanas de la península ibérica, estando ligado su aprovechamiento con el desarrollo económico y social. Asimismo, se trata de especies autóctonas maderables.

2. Objetivos

El objetivo del presente documento es la calibración y adaptación de modelos de crecimiento estáticos y dinámicos para *Pinus pinea* y *Pinus pinaster mesogensis* así como el desarrollo de metodologías para la conversión del volumen de rodal a biomasa y su posterior transformación a absorciones generadas de CO₂ simulando el alargamiento de turno de estas masas forestales.

3. Metodología

Modelos de producción

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, desarrollados para distintas especies forestales.

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 sí 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 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.

Metodología de adaptación de modelos (I): estimación del volumen a lo largo del ciclo

Como ejemplo de modelo estático, se utilizan las relaciones fundamentales (Tabla 1) empleadas para la elaboración de la tabla de producción para *Pinus pinea* presentada en SERRADA ET AL. (2008), obtenidas a partir de la red de parcelas permanentes que el INIA mantiene en masas forestales de la especie en el suroeste de la Comunidad de Madrid, oeste de Andalucía, Cataluña y centro de Castilla y León. En este documento, 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 de acuerdo con el modelo de CALAMA ET AL. (2003).

Tabla 1. Relaciones fundamentales para *Pinus pinea*. Fuente: CALAMA ET AL. (2003) y SERRADA ET AL. (2008).



Ecuaciones

Pri
me
ra
rel
aci
ón
fun
da
me
ntal

$$H2=EXP(4,1437+(\ln [H1])-4,1437\cdot(T2/T1)(-0,3935))$$

Seg
un
da
rel
aci
ón
fun
da
me
ntal

$$100/\sqrt{N}=4,4965+0,0211\cdot H0-\sqrt{T}$$

Ter
ce
ra
rel
aci
ón
fun
da
me
ntal

$$Dg=-1,632+1,2068\cdot(100/\sqrt{N})+2,1027\cdot H0$$

Cua
rta
rel
aci
ón
fun
da
me
ntal

$$V=3,3914+0,4414\cdot G\cdot H0$$

Qui
nta
rel
aci
ón
fun
da
me
ntal

$$Hm=-0,3998+0,9649\cdot H0$$

don de	N	es el nú me ro de pie s por hec tár ea,	H	la altu ra do mi nan te en m,	H	es la cali dad de est aci ón en m,	T	es la eda d de ref ere nci a,	T	es la eda d del rod al,	Dg	el diá met ro me dio cua drá tico en cm,	V	el vol um en m ³	/ha	G	el áre a bas imé tric a en m ²	/ha	Hm	la altu ra me dia en m.
-----------	-----	--	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	------	--	-----	---	-----	-----	---	-----	------	---

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Pinus pinaster mesogeensis* han sido obtenidas del inventario del Sistema Central realizado por BRAVO-OVIEDO ET AL. (2004) (Tabla 2). En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado cinco calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 12, 15, 18 y 21 m.

Tabla 2. Funciones dinámicas para *Pinus pinaster mesogeensis*. Fuente: BRAVO-OVIEDO ET AL. (2004).



Ecuaciones

Altura dominante	$H2=EXP(4,016+(\ln [H1])-4,016\cdot(T2/T1)-0,5031))$
Volumen comercialidad natural	$LnV=b0+b1\cdot S+(b2/t)+b3\cdot LnG$
Área basimétrica	$LnG(i+5)=(ti/t(i+5))\cdot LnGi+[(a0+a1\cdot S)\cdot(1-ti/t(1+5))]$
Volumen comercialidad natural	$LnV(i+5)=[b0+b1\cdot S+(b2/t(1+5))+b3\cdot(ti/t(1+5))\cdot Ln(Gi)+b3\cdot(a0+a1\cdot S)\cdot(1-ti/t(1+5))]$
Densidad	$N(i+5)=Ni\cdot EXP(d0\cdot(t(i+5)-ti))$

donde N es el número de pies por hectárea, H_2 la altura dominante, H_1 es la calidad de estereón, T_1 es la edad de referencia, T_2 es la edad actual del rodal, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m³/ha, G el área basimétrica en m²/ha, S es el índice de sitio en m.

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para el modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. Este régimen de silvicultura en el que se establezcan las claras de la masa ha sido definido a partir del Compendio de Silvicultura de España (SERRADA ET AL., 2008) para las dos especies objeto (Figura 1). Para ambas especies, la estimación del C fijado por la línea base, con turno de 100 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. En *Pinus pinea* se propone un régimen de claras fuertes y precoces, orientado a llegar a final de turno con 150 pies/ha, mientras que en *P. pinaster* el programa de claras busca llegar a final de turno con unos 400 pies/ha.

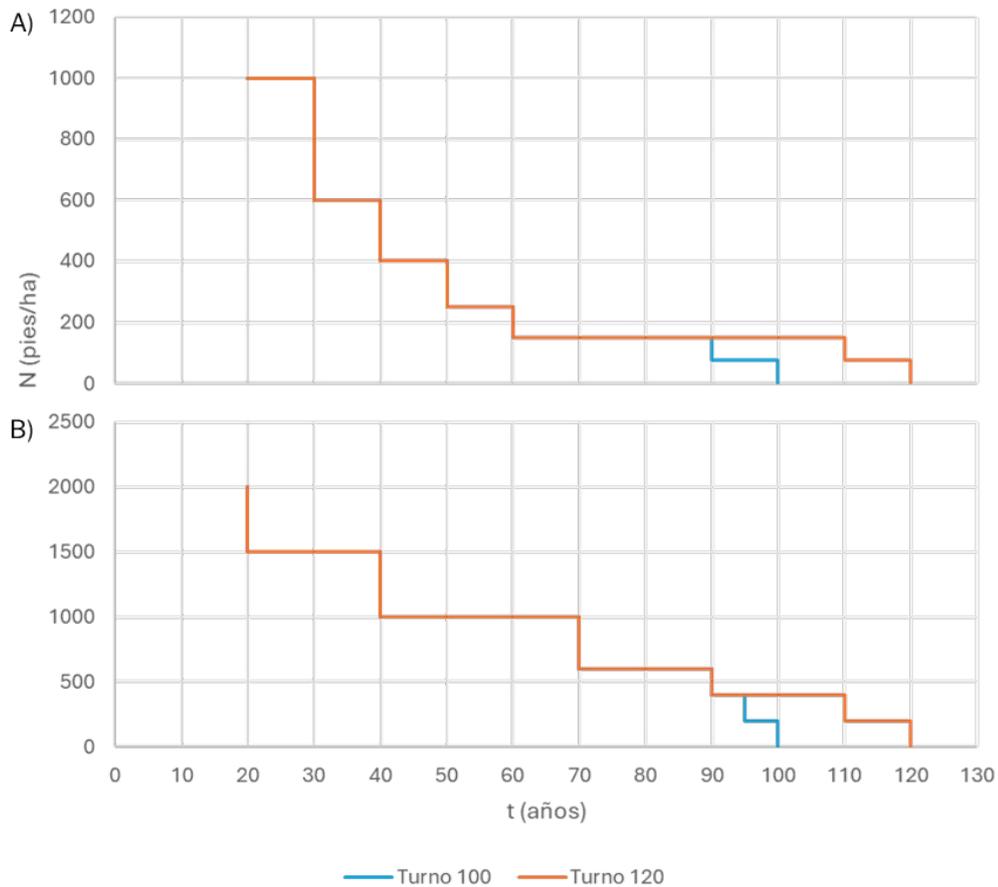


Figura 1. Esquema de claras para A) *Pinus pinea* y B) *Pinus pinaster mesogensis* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: SERRADA ET AL. (2008).

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal. Este volumen del rodal se ha proyectado para los dos modelos bajo calidades de estación intermedias. Para el caso de *Pinus pinea* se ha utilizado una calidad de 13 m y para *Pinus pinaster mesogensis*, 15 m. Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, dg_{EXT} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$[dg]_{EXT} = [dg] \cdot 1,0,9 \quad [1],$$

$$G_{ext} = (\pi/40.000) \cdot [dg]^{2EXT} \cdot N_{ext} \quad [2],$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad [3],$$

donde dg_i es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir la intensidad de la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.



El factor definitorio de la pesode la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

Metodología de adaptación de modelos (II): conversión en biomasa y CO₂ fijado

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

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 3) en combinación con PITA (1967) y RUÍZ-PEINADO ET AL. (2011 y 2012). Esta metodología es aplicada para *Pinus pinea*.

Tabla 3. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología para *Pinus pinea*.



Biomasa total	$WT(tM.S.)=BEF \cdot Vu \cdot (1+R)$			
Factor expansión biomasa	$BEF=Wu/Vu$			
Volumen individual	$Vu=5,61 + 3,935 \cdot ((Dg] 2 \cdot Hm) / 100) + 2,989 \cdot ((Dg] 2 \cdot Hm) / 108) 2$		PITA (1976)	
Biomasa árbol unitario	$Wu=WFuste/(1-WC_WT)$		MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ ET AL. (2021)	
Biomasa de fuste	$Wfuste = \beta_0 \cdot ((Dg] 2 \cdot Hm) + \beta_1)$, donde β	es 0,0294 y β		es 0,9573.
Relación de copa	$WC_WT = \beta_2 \cdot ((Dg] 2 \cdot Hm) + \beta_3)$, donde β	es 1,0891 y β		es -0,1152.
Relación raíz-vástago	$R=0,243$		RUÍZ-PEINADO ET AL. (2011)	
donde W	es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, BEF es el factor de expansión de biomasa, V	es el volumen de árbol individual, W	es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro fuste, Hm la altura media, W	es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

b) Metodología 1B (M1B). Cuando no se dispone del valor correspondiente a la altura media (Hm), no se puede desarrollar la metodología de MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ ET AL. (2021). En estos casos, la biomasa viva aérea se calcula multiplicando el volumen maderable por los factores de expansión de biomasa en el que se incluye la densidad (BEFD) extraídos de las publicaciones de METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES (SEI, 2024). Esta metodología es aplicada para *Pinus pinaster mesogensis* (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la Metodología 1B para *Pinus pinaster mesogensis*.



Biomasa total	$WT(t.M.S.)=BEFD \cdot V \cdot (1+R)$	SEI (2024)
Factor expansión biomasa		BEFD=0,55
Relación raíz-vástago	R=0,285	RUÍZ-PEINADO ET AL. (2011)
donde W	T	es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, BEFD es el factor de expansión de biomasa en el que se incluye la densidad, V es el volumen maderable y R es la relación raíz-vástago.

c) 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 %. El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia. Esta metodología es aplicada para *Pinus pinea* y *Pinus pinaster mesogensis* (Tabla 5).

Tabla 5. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología para A) *Pinus pinea* y B) *Pinus pinaster mesogensis*.

Biomasa total	$WT(t.M.S.)=Wfust \cdot \frac{e^{(1-WC_WT)}}{(1+R)}$	-
Biomasa de fuste	$Wfuste=(d12\%-0,828) \cdot V$	VIEILLEDENT ET AL. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d12\%=0,60625$	GUTIÉRREZ OLIVA Y PLAZA PULGAR (1967)
Relación de copa	$WC_WT=\beta_2 \cdot \left(\frac{Dg}{2 \cdot Hm} \right)^{\beta_3}$, donde β	1,0891 y β_3 es -0,1152 MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ ET AL. (2021)
Relación raíz-vástago	R=0,243	RUÍZ-PEINADO ET AL. (2011)
B) <i>Pinus pinaster mesogensis</i>		
Ecuación		Fuente
Biomasa total	$WT(t.M.S.)=Wfust \cdot \frac{e^{(1-WC_WT)}}{(1+R)}$	-
Biomasa de fuste	$Wfuste=(d12\%-0,828) \cdot V$	VIEILLEDENT ET AL. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d12\%=0,52850$	GUTIÉRREZ OLIVA Y PLAZA PULGAR (1967)
Relación de copa	WC_WT=0,187	MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ ET AL. (2021)
Relación raíz-vástago	R=0,285	RUÍZ-PEINADO ET AL. (2011)
T	12%	fuste
		c
		t

La justificación del empleo de distintas metodologías para la conversión de biomasa radica en que no se dispone de suficiente información en todas las



especies para el empleo de una única. Así, en el caso de poder desarrollarse varias para una especie, existirá una preferencia por la 2ª metodología (M2).

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

$$[\text{CO}_2] = W_T \cdot F_C \cdot \left(\frac{[\text{CO}_2]}{[\text{PM}] C} \right) \quad [4],$$

donde W_T es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono, 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.

4. Resultados

En primer lugar, gracias a la metodología descrita anteriormente, se obtienen las tablas de biomasa para cada rodal en función del distinto régimen de silvicultura establecido. Estas tablas se han sintetizado en una serie de gráficos que permiten visualizar de manera sencilla el contenido de biomasa para cada una de las especies según las metodologías empleadas. Se muestran, asimismo, los valores medios de contenido de biomasa en pie a lo largo del ciclo, y biomasa acumulada (biomasa en pie más biomasa extraída en las claras) anual. En los ejemplos se muestra la comparación para un ciclo, pero hay que tener en cuenta que las comparaciones entre línea base y gestión mejorada se refieren siempre a sucesivos ciclos.

Para *Pinus pinea* (Figura 2) la metodología 2 muestra unos valores medios superiores de biomasa en pie (Tabla 6. A) con una diferencia media de alrededor de 6 – 8 t al realizar alargamiento de turno), aunque ambas metodologías describen prácticamente la misma trayectoria. Los stocks anuales de biomasa en pie son superiores en ambos casos para la línea base respecto al alargamiento de turno (Tabla 6. A)).

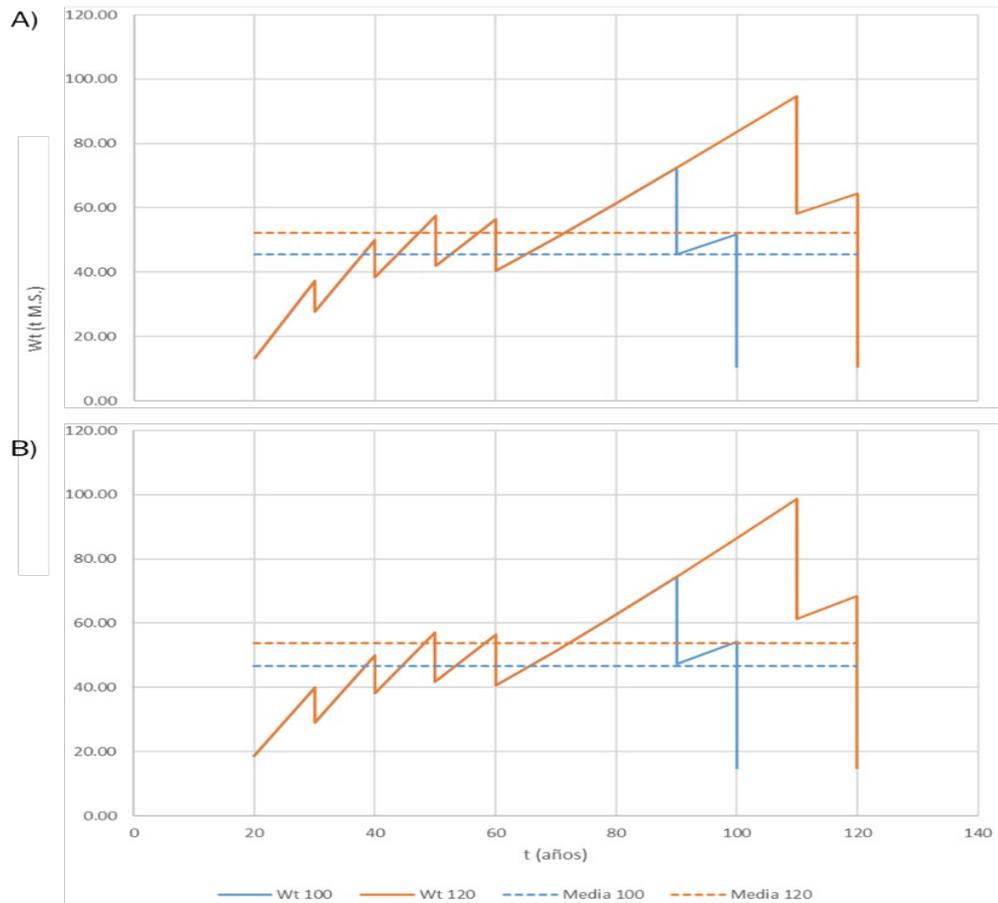


Figura 2. Evolución comparativa de la biomasa en pie entre la línea base (azul) y el alargamiento de turno (naranja) del rodal para *Pinus pinea* según CALAMA ET AL. (2003) empleando A) la metodología 1 (M1) y B) la metodología 2 (M2).

Para *Pinus pinaster mesogensis* (Figura 3) la metodología 1B muestra unos valores medios superiores de biomasa en pie (Tabla 6. B) con una diferencia de en torno a 11,4 t respecto de la línea base), aunque ambas metodologías describen prácticamente la misma trayectoria. Los stocks anuales de biomasa en pie son superiores en ambos casos para la línea base (Tabla 6. B)).

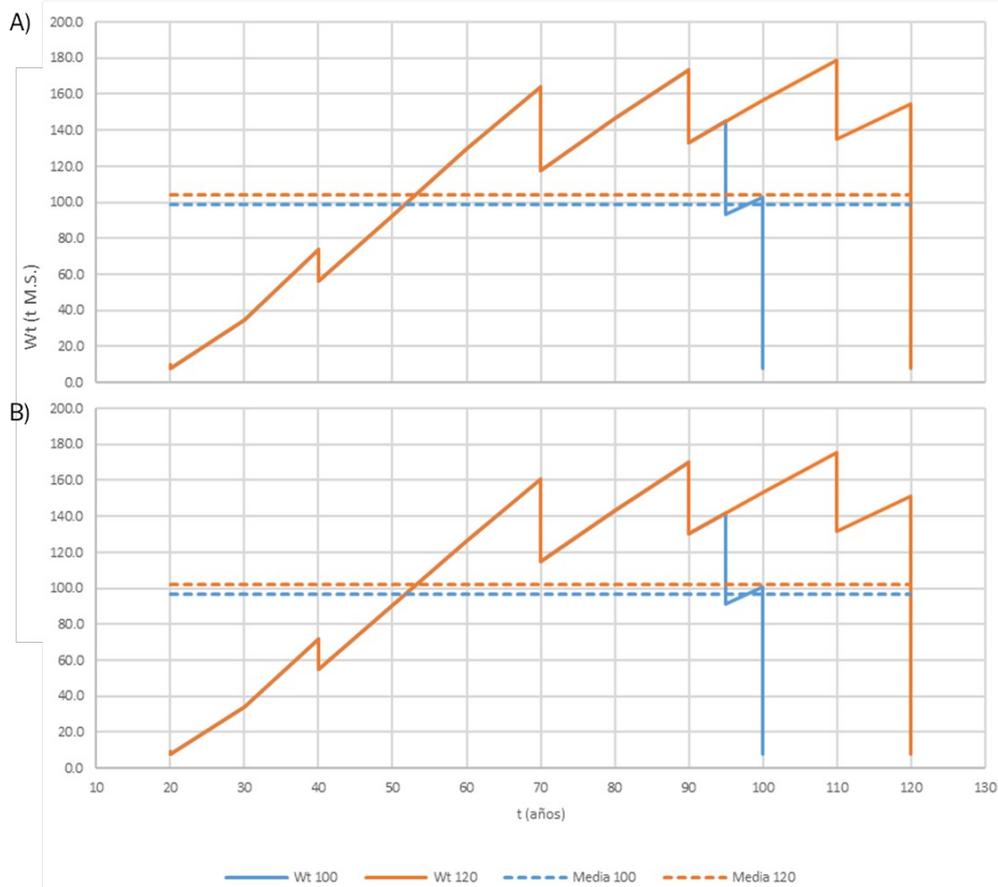


Figura 3. Evolución comparativa de la biomasa en pie entre la línea base (azul) y el alargamiento de turno (naranja) del rodal para *Pinus pinaster mesogensis* según BRAVO-OVIEDO ET AL. (2004) empleando A) la metodología 1B (M1B) y B) la metodología 2 (M2).

Las variaciones de diferencia en la estimación de biomasa (Tabla 6) para cada una de las metodologías son reducidas representando un cambio de alrededor de 2 % de incremento de la metodología 2 en *Pinus pinea* y de -2 % de cambio de la metodología 2 en *Pinus pinaster mesogensis*.

Tabla 6. Valores de biomasa media en pie, biomasa acumulada anual, absorción media y absorción acumulada anual para los dos turnos de corta y las dos metodologías, así como su diferencia en toneladas de materia seca (t M.S.) en biomasa y toneladas de CO² (t CO₂) en absorciones para A) *Pinus pinea* y B) *Pinus pinaster mesogensis*.

A) <i>Pinus pinea</i>						
Metodología 1			Metodología 2			
Turno 100	Turno 120	Diferencia (t)	Turno 100	Turno 120	Diferencia (t)	
Biomasa media	46,06	53,03	7,82	47,24	54,68	6,30



B. acumulada anual	1,21	1,19	-0,02	1,20	1,21	-0,01
Absorción media	85,80	98,78	12,98	87,99	100,14	12,15
A. acumulada anual	1,48	1,39	-0,09	1,51	1,42	-0,09

B) *Pinus pinaster mesogensis*

Metodología 1B			Metodología 2			
Turno 100	Turno 120	Diferencia (t)	Turno 100	Turno 120	Diferencia (t)	
Biomasa media	99,93	111,52	11,59	97,79	109,13	11,34
B. acumulada anual	2,55	2,49	-0,06	2,50	2,44	-0,06
Absorción media	187,23	208,94	21,71	183,23	204,48	21,25
A. acumulada anual	4,79	4,67	-0,12	4,68	4,57	-0,11

Tras realizar la conversión de biomasa a absorciones de CO₂ detallada en la metodología, se exponen de forma sintética nuevamente figuras que representan las variaciones entre metodologías (Figura 4).

Tanto para *Pinus pinea* como para *Pinus pinaster mesogensis* (Figura 4) la metodología 2 y 1B, respectivamente, muestran unos valores medios superiores de absorciones al realizar el alargamiento (Tabla 6. B)). Los stocks de dióxido de carbono son superiores en ambos casos para el alargamiento de turno respecto de la línea base (Tabla 6. B)).

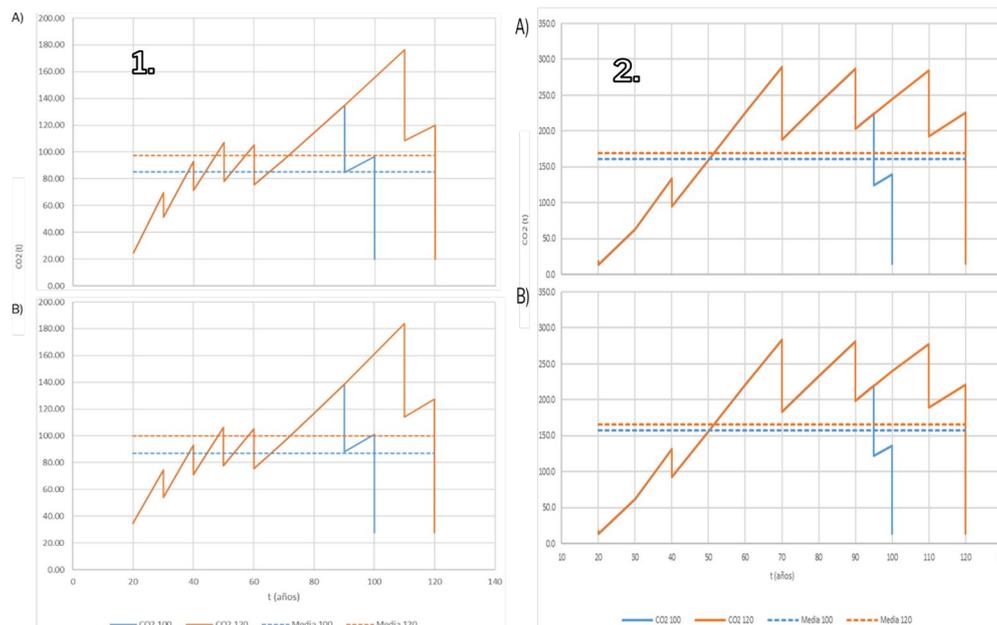




Figura 4. Evolución comparativa de las absorciones de CO₂ en toneladas (t) entre la línea base (azul) y el alargamiento de turno (naranja) del rodal para 1. *Pinus pinea* según CALAMA ET AL. (2003) empleando A) la metodología 1 (M1) y B) la metodología 2 (M2) y 2. *Pinus pinaster mesongensis* según BRAVO-OVIEDO ET AL. (2004) empleando A) la metodología 1B (M1B) y B) la metodología 2 (M2).

Cabe reseñar que tanto la biomasa acumulada anual como las absorciones acumuladas anuales para ambas especies y metodologías disminuyen al realizar el alargamiento de turno (Tabla 6).

5. Discusión

En el trabajo se presenta una metodología de adaptación y calibración de modelos de crecimiento y producción desarrollados para las principales especies forestales españolas (ver BRAVO ET AL., 2012), al objeto de poder calcular el efecto que sobre la biomasa y carbono contenido en el bosque tiene el alargamiento del turno. Junto con los modelos se emplean distintas ecuaciones de biomasa individual, biomasa de copa, volumen individual y densidad de la madera recogidas en la bibliografía para cada una de las especies ejemplificadas.

El método propuesto permite simular las diferencias en biomasa en pie y acumulada a lo largo del ciclo, comparando un turno dado con una propuesta de gestión mejorada basada en el alargamiento del turno (AMERAY ET AL., 2021). En los ejemplos propuestos se observa un incremento de los stocks de biomasa en pie asociados con el alargamiento del turno tanto para *Pinus pinea* como para *Pinus pinaster mesogensis*, resultado similar al observado en la literatura científica para otras especies, como es el caso de *Eucalyptus globulus* (PÉREZ CRUZADO ET AL., 2012), *Pinus sylvestris* (LISKI ET AL., 2001) o los bosques boreales canadienses (BOISVENUE ET AL., 2012). Sin embargo, es importante reseñar que este efecto no tiene por qué ser igual en todas las especies, ni dentro de una misma especie, en todos los regímenes de selvicultura aplicada. De hecho, al comparar la biomasa acumulada anual (suma de la biomasa en pie y biomasa extraída) el efecto del alargamiento del turno puede disiparse o incluso ser negativo, produciendo unas tasas menores respecto al nivel de base. Esto se debe a que el alargamiento del turno provoca un alejamiento del turno de máxima renta en especie (donde se maximiza crecimiento medio) y por tanto la tasa de crecimiento media disminuirá con el alargamiento del turno y pasados infinitos ciclos producirá una menor cantidad total de biomasa. No obstante, lo que se pretende conseguir mediante esta práctica de gestión mejorada de alargamiento de turno es aumentar la cantidad de biomasa viva en pie fijada a lo largo de infinitos ciclos, no la biomasa total producida. Otro aspecto que habría que tener en cuenta también la mayor vida útil de los productos que se obtienen con los turnos alargados. En ese sentido, es importante considerar que en la selección de turno deben tenerse en cuenta otros aspectos aparte de la fijación de C, como puede ser la prevención del fuego (DIAZ-BALTEIRO ET AL. 2014)



La metodología propuesta permite su extensión a todas aquellas especies de las que se disponga un modelo de crecimiento de rodal de tipo estático (tabla de producción) o dinámico. La principal ventaja de los modelos dinámicos es que van a permitir realizar proyecciones sobre un dato de área basimétrica real, medido en inventario. Los modelos estáticos, por su parte, solo van a permitir realizar proyecciones del número de pies y la altura dominante para una calidad de estación dada.

Respecto a las metodologías planteadas para el cálculo de biomasa en pie y absorciones a partir del volumen del rodal, ambas presentan diferencias entre sí en sus resultados, pero se encuentran dentro del margen de incertidumbre de los modelos de crecimiento, no olvidando que estos son aproximaciones de fenómenos naturales que pueden ser modificados por numerosas perturbaciones tanto abióticas como bióticas (MOLLES, 2013). Por ello, se plantea el uso prioritario de la Metodología 2 que tiene en cuenta parámetros como la densidad de la madera, y en su defecto, la Metodología 1 que parte principalmente de los valores de altura media del rodal. Asimismo, para aquellos en que no se disponga de la información necesaria, cabe la posibilidad de emplear otras metodologías de conversión de volumen a biomasa. En cualquier caso, se recomienda el empleo de metodologías específicas desarrolladas junto con los modelos de crecimiento por parte de la comunidad científica.

En el futuro está previsto presentar una calculadora que junto con *Pinus pinaster mesogensis* y *P. pinea* incluya las herramientas de cálculo para las siguientes especies: *Pinus sylvestris*, *P. nigra*, *P. halepensis*, *P. pinaster Atl.*, *Quercus robur*, *Q. pyrenaica*, *Fagus sylvatica*, *Castanea sativa*, *Betula sp.* y *Populus sp.*, además se incluirán como especies maderables no nativas: *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* y *Pseudotsuga menziesii*.

Pese a la potencialidad de la metodología propuesta, esta presenta algunas limitaciones. La primera es que para la mayor parte de las especies no hay disponibles modelos dinámicos, lo que obliga al uso de los modelos estáticos, con las limitaciones antes citadas. La segunda es que no debe usarse para regímenes de claras muy alejados de los utilizados en la construcción de los modelos, ni en alargamientos de turno excesivos. Además, la metodología se centra únicamente en la biomasa arbórea, no teniendo en cuenta el efecto del alargamiento del turno sobre la biomasa fijada en otros compartimentos, como el suelo, *litter* o madera muerta. Por último, al ser modelos independientes del clima, no consideran el posible efecto que el cambio climático pueda tener sobre el potencial de absorción de biomasa y C de los bosques, ni la sinergia entre este efecto y el alargamiento del turno. El desarrollo en el futuro de modelos de procesos tipo CBM-CFS3 (BOISVENUE ET AL., 2012) o CO2Fix (MASERA ET AL., 2003), o su calibración para las especies españolas, permitiría considerar todos estos aspectos.

6. Conclusiones



La implementación de herramientas de cálculo, mediante la calibración y desarrollo de modelos de crecimiento estáticos y dinámicos, permite el estudio de distintos regímenes y escenarios de silvicultura para las diferentes masas forestales españolas presentes en la Península Ibérica. En este sentido, la cuantificación de la biomasa en pie producida por el rodal y su transformación a absorciones generadas de CO₂, por dichas herramientas, permite establecer un sistema de inventario de unidades o créditos de carbono a través del cual evaluar la efectividad de los proyectos y regímenes planteados.

Por otro lado, el alargamiento de turno permite que la media de biomasa en pie y absorciones producidas en pie por el rodal sea superior respecto de la línea base en términos acumulados lo que conlleva un aumento de estas mediante el establecimiento de ciclos infinitos de silvicultura. Cabe destacar que al alejarse el turno de la máxima renta de obtención de biomasa media el crecimiento medio disminuye. Así, los datos muestran medias superiores para ambos parámetros con pocas diferencias entre metodologías, lo que incita al empleo de modelos dinámicos por las ventajas anteriormente expuestas.

Como contrapartidas, se destacan principalmente la falta de información o de desarrollo de modelos adaptables a las condiciones específicas de los proyectos planteados y la independencia de estos frente a los efectos y sinergias producidas en el contexto del cambio climático.

7. 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.

8. Bibliografía

AMERAY, A.; BERGERON, Y., VALERIA, O; MONTORO GIRONA, M.; CAVARD, X.; 2021. Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Curr Forestry Rep*7, 245–266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>.

BASTIN J. F.; FINEGOLD, Y.; GARCÍA, C.; MOLLICONE, D.; REZENDE, M.; ROUTH, D.; ZOHNER, C. M.; CROWTHER, T. W.; 2019. The global tree restoration potential, *Science* 365 (80), 76–79.

BOISVENUE C.; BERGERON Y.; BERNIER P.; PENG C.; 2012. Simulations show potential for reduced emissions and carbon stocks increase in boreal forests under



ecosystem management. *Carbon Manag.* 3 (6), 553–68.
<https://doi.org/10.4155/cmt.12.57>.

BRAVO. F.; ALVAREZ-GONZALEZ, J. G.; DEL RIO, M.; BARRIO. M.; BONET, J. A.; BRAVO-OVIEDO, A.; CALAMA, R.; CASTEDO-DORADO, F.; CRECENTE-CAMPO, F.; CONDES, S.; DIEGUEZ-ARANDA, U.; GONZALEZ-MARTINEZ, S. C.; LIZARRALDE, I.; NANOS, N.; MADRIGAL, A.; MARTINEZ-MILLAN, F. J.; MONTERO, G.; ORDOÑEZ, C.; PALAHI M.; PIQUE, M.; RODRIGUEZ F.; RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R.; ROJO, A.; RUIZ-PEINADO, R.; SANCHEZ-GONZALEZ, M.; TRASOBARES, A.; VAZQUEZ-PIQUE, J.; 2012. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. Edita IUGFS-USC. 72. Madrid- ISBN: 978-84-615-7145-1.

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.; MONTERO, G.; 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals Forest Science*, 60, 259-269.

DIAZ-BALTEIRO, I.; MARTEL, D.L.; ROMERO, C.; WINATRAUB, A. 2014. The optimal rotation of a flammable forest stand when both carbon sequestration and timber are valued: a multi-criteria approach. *Natural Hazards*, 72, 375-387

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.; SÁNCHEZ.RODRÍGUEZ, F. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFC). Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.

ECO2FOR; 2024. Qué es eco2for. [en línea] Disponible en: <<https://eco2for.com/que-es-eco2for/>> [consulta: 15 de enero de 2025].

GUTIÉRREZ-OLIVA, A.; PLAZA PULGAR, D.; 1967. Características físico-mecánicas de las maderas españolas. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE). Ministerio de Agricultura. Madrid.

LISKI, J.; PUSSINEN, A.; PINGOUD, K.; MÄKIPÄÄ, R.; KARJALAINEN, T.; 2001 Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Can J For Res.* 31 (11), 13.

MADRIGAL, A.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; ROJO, A.; 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle



de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.

MASERA, O.R.; GARZA-CALIGARIS, J. F.; KANNINEN, M.; KARJALAINEN, T.; LISKI, J.; NABUURS, G. J.; PUSSINEN, A., DE JONG, B. H. J.; MOHREN, G. M. J.; 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V. 2 approach. *Ecol Model* 164, 177–199. doi:10.1016/S0304-3800(02)00419-2

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; 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].

MOLLES, M. C.; 2013. *Ecología: conceptos y aplicaciones*. 3ª Ed. McGraw Hill Interamericana de España. Madrid.

MONTERO, G.; RUÍZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Ministerio de Educación y Ciencia. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. CIFOR-INIA. Monografías INIA: Serie Forestal. Madrid.

PAQUETTE, A.; HAWRYSHYN, J.; VYTA SENIKAS, A.; POTVIN, C.; 2009. Enrichment planting in secondary forests: a promising clean development mechanism to increase terrestrial carbon sinks. *Ecology and Society* 14 (1), 31.

PEREZ-CRUZADO, C.; MANSILLA-SALINERO, P.; RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R.; MERINO, A.; 2012. Influence of tree species on carbon sequestration in afforested pastures in a humid temperate region. *Plant Soil* 353 (1–2), 333–53.

PITA, A.; 1967. *Tablas de cubicación por diámetros normales y alturas totales*. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.

RUÍZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; DEL RÍO, M.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20 (1), 176-188.

RUÍZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; DEL RÍO, M.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21 (1), 42-52.



SERRADA, R.; MONTERO, G.; REQUE, J. A.; 2008. Compendio de Selvicultura Aplicada de España. Madrid.

SHARMA, T.; KURZ, W. A.; STINSON, G.; PELLATT, M. G.; LI, Q.; 2013. A 100-year conservation experiment: Impacts on forest carbon stocks and fluxes, *Forest Ecology and Management* 310, 242-255. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.048>.

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. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. SEI. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/metodologias-estimacion-emisiones.html> [Consultado 17/09/24].

VANCLAY, J.; 1994. *Modelling Forest Growth and Yield*. CAB International. Wallingford, Uk. 311.

VIEILLEDENT, G.; FISCHER, F. J.; CHAVE, J.; GUIBAL, D.; LANGBOUR, P.; 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