Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 49(2): 117-132 (2023)
Doi: https://doi.org/10.31167/csecfv5i49.19946
Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales
Acceso abierto disponible en http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index

Premio Universitario de la SECF 2022 a la mejor Tesis Doctoral

Modelización de la madurez forestal en base a datos del Inventario Forestal Nacional y el escáner láser terrestre

Modelling forest stand maturity from National Forest Inventory and terrestrial laser scanning data

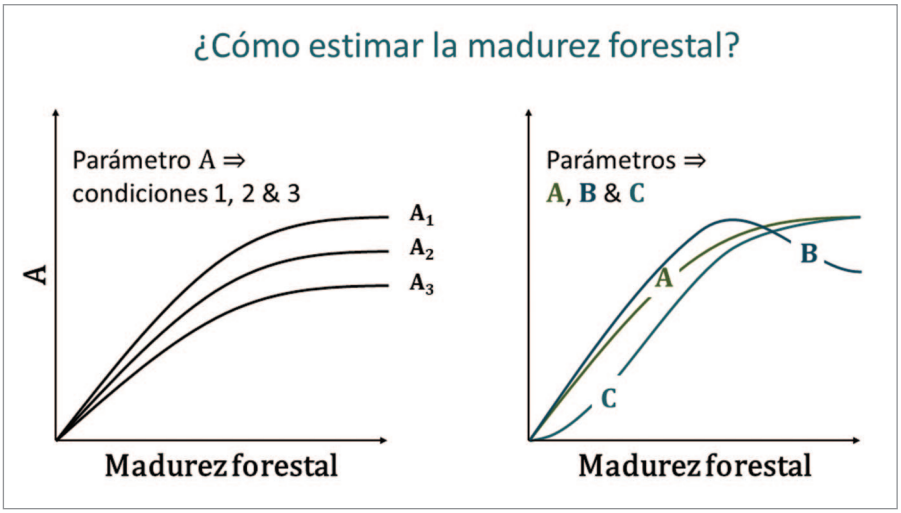
Molina-Valero, J.A.[1,2,3*]

[1] *Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible (UXAFORES), Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Benigno Ledo s/n, Campus Terra, 27002 Lugo, Spain*

[2] *Proyectos y Planificación (PROEPLA), Departamento de Producción Vegetal y Proyectos de Ingeniería, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Benigno Ledo s/n, Campus Terra, 27002 Lugo, Spain*

[3] *Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague (CZU), 16 500 Prague, Czech Republic*

[*] Autor de correspondencia: molina_valero@fld.czu.cz



Resumen

Este resumen gráfico representa una síntesis de la tesis doctoral, donde las gráficas ejemplifican cómo la madurez (o grado de naturalidad) forestal, desde un punto de vista cuantificable y por lo tanto monitorizable, puede ser estimada en base a diferentes parámetros hipotéticos (p. ej. *A*, *B* y *C*). Sin embargo, tal y como se observa en la figura, estos parámetros pueden comportarse de diferentes formas a lo largo de un gradiente de madurez. Pongamos el caso de un hipotético parámetro *A* que podría alcanzar su valor máximo para un cierto grado de madurez, valor máximo que a su vez puede depender de las condiciones del sitio, como por ejemplo la calidad de estación (gráfico de la izquierda). Sin embargo, distintos parámetros probablemente muestren diferentes comportamientos a lo largo del gradiente de madurez forestal, manifestando diversas tendencias y alcanzando sus valores máximos para diferentes grados de madurez (gráfica de la derecha). Esta tesis ocupa el nicho de investigación relacionado con la modelización de algunos de estos parámetros de madurez como son el stock de biomasa o índices para la caracterización de la estructura forestal, utilizando para ello parcelas experimentales necesarias para probar las hipótesis de partida y datos del Inventario Forestal Nacional. Además, se utilizaron tecnologías novedosas en la monitorización de los bosques como el escáner láser terrestre (TLS). Esto propició la necesidad de desarrollar una herramienta capaz de procesar y analizar los datos del TLS, naciendo así el paquete de R FORTLS, considerado uno de los principales frutos de este trabajo de tesis doctoral.

Palabras clave: *bosques naturales, estructura forestal, monitorización forestal, secuestro de carbono, software libre, tecnología LiDAR terrestre*

Abstract

Estimation of forest maturity linked to the biomass (or carbon) stock capacity is considered one of the most important issues regarding forest management and planning in the most recent forest strategies and policies. This doctoral thesis explores such relationships and considers the use of stand level maximum biomass stock (*MBS*) as a proxy for forest maturity through site quality gradient, as a measure that can feasibly be estimated from National Forest Inventory (NFI) data. The research study was conducted in Spain using NFI data and a non-probabilistic collection of mature plots. Both data sources correspond to maritime pine (*Pinus pinaster* ssp. *atlantica* H. de Vill.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), beech (*Fagus sylvatica* L.), beech-fir and silver fir (*Abies alba* Mill.) forests. Finally, the potential of terrestrial laser scanning (TLS) technology for estimating forest features in mature stands was also explored. For this purpose, the R package FORTLS was developed.

Key words: *carbon stock, close-range LiDAR devices, forest monitoring, forest naturalness, forest structure, open-source software.*

1. Introducción

La evaluación de la madurez de los bosques es un requerimiento exigido por las políticas de conservación y gestión forestal sostenible (Chiarucci & Piovesan, 2020). "Old-growth" es el término más utilizado para referirse a grados de madurez altos, haciendo alusión a bosques que han llegado a los últimos estadios de la sucesión ecológica bajo una dinámica natural y en ausencia de grandes perturbaciones (Wirth *et al.*, 2009). Estos bosques destacan por proveer múltiples servicios ecosistémicos, por lo que se consideran un marco referencial para la gestión y conservación de los ecosistemas forestales (Ford & Keeton, 2017). Esto hace que cada vez sea más necesaria su caracterización mediante indicadores objetivamente cuantificables y monitorizables que permitan estimar un marco referencial de madurez *(Fig. 1)*.

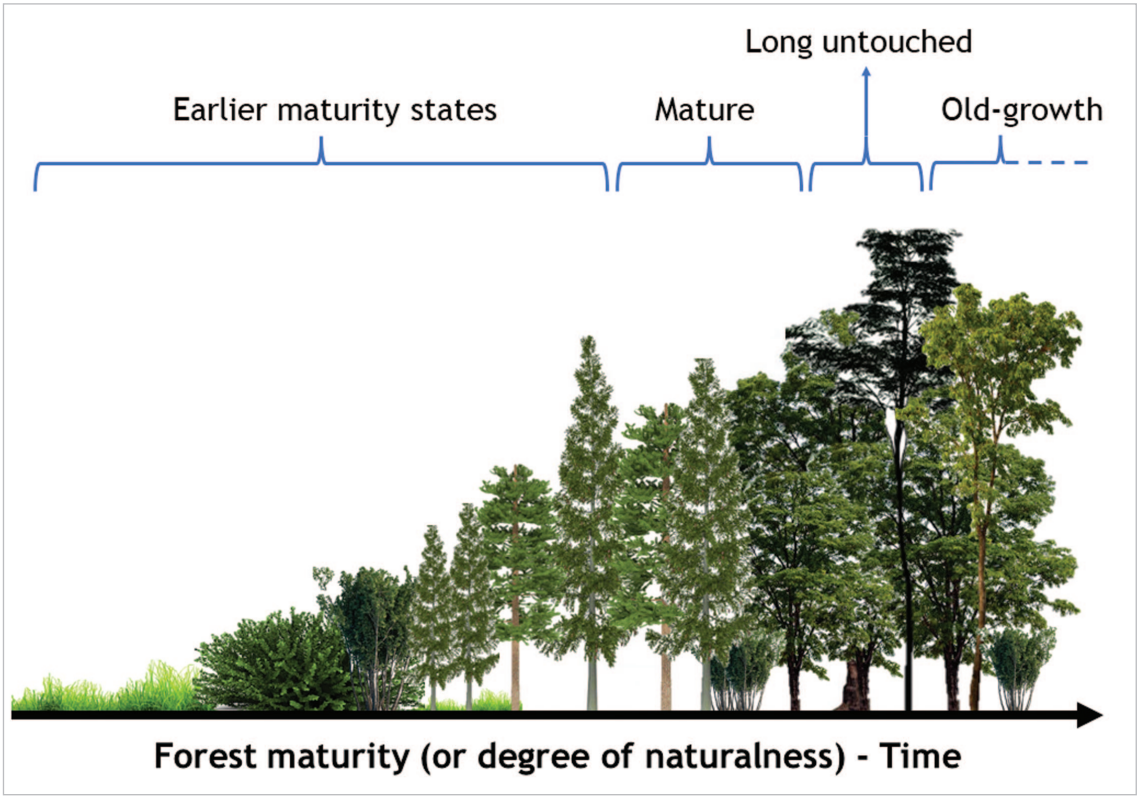


Figura 1. Términos utilizados en esta tesis para hacer referencia a los distintos grados de madurez. El término long-untouched hace referencia a bosques relativamente intactos que no han sufrido alteraciones antrópicas al menos en los últimos 60-80 años, o si no, durante un periodo relativamente largo.

Un aspecto fundamental de las masas forestales es su papel como sumideros de carbono, lo cual ha situado a los bosques catalogados como old-growth en el centro de miras debido a su capacidad para generar múltiples servicios ecosistémicos, incluido el stock de carbono. No obstante, el rol de estos bosques como reservorios de carbono no está tan claro y existe gran controversia al respecto. Hay trabajos que demuestran que se puede llegar a valores máximos de este servicio ecosistémi-

co en estados de madurez previos al de old-growth (Molina-Valero *et al.*, 2021), mientras que otros indican que incluso para estados de madurez muy avanzados aún es posible incrementar la cantidad de carbono almacenado (Luyssaert *et al.*, 2008). Todo lo comentado anteriormente tiene especial relevancia en los mecanismos de compensación de las emisiones de CO_2, donde se necesitan metodologías rigurosas para la estimación del carbono almacenado en las masas forestales (Grassi *et al.*, 2017). Por lo tanto, la capacidad de los bosques para almacenar carbono a lo largo del tiempo juega un papel relevante, pudiéndose establecer un umbral máximo determinado por su madurez y para un gradiente de calidad de estación *(Fig. 2)*. Esto sería de gran utilidad para estimar el stock de biomasa en base a datos del Inventario Forestal Nacional (IFN).

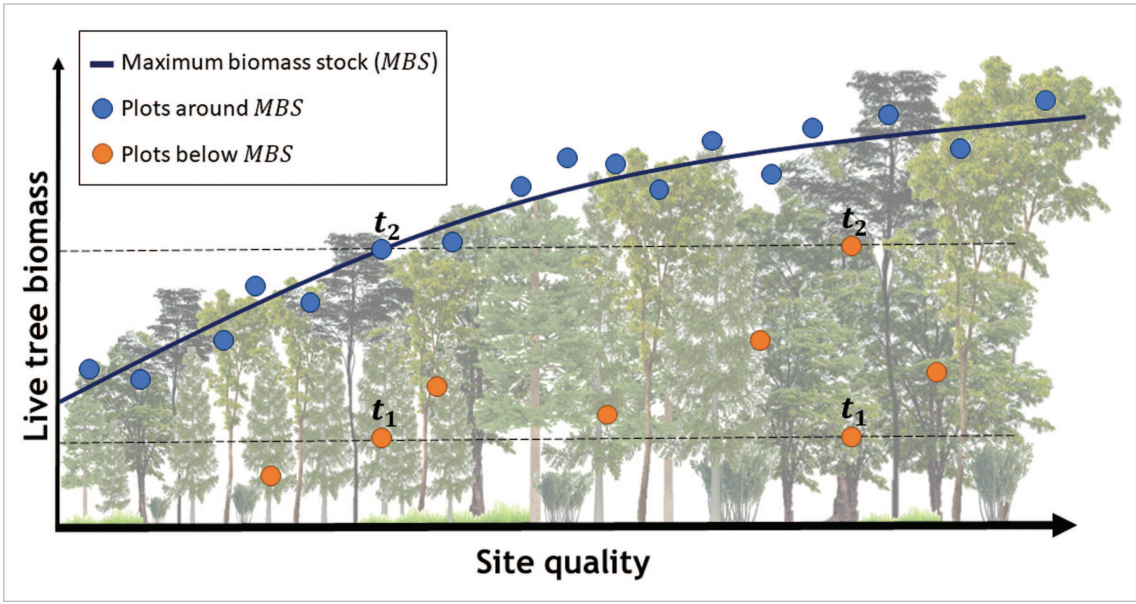


Figura 2. Representación del stock de biomasa de árboles vivos (eje y) a través de un gradiente de calidad de estación (eje x). En la figura se representan parcelas que tienen aproximadamente el máximo stock de biomasa (*MBS*) con puntos azules (plots around *MBS*) y otras con niveles inferiores con puntos naranjas (plots below *MBS*). En la figura se observa también como para el mismo cambio absoluto en la biomasa de árboles vivos entre dos momentos (t_1 y t_2), el stock de biomasa relativo en t_2 depende de las condiciones específicas del lugar. Por lo tanto, el almacenamiento de carbono forestal no puede evaluarse exclusivamente mediante el enfoque del cambio en las reservas de carbono entre dos momentos, sino que debe tenerse en cuenta la calidad de estación.

Se sabe que muchas de las propiedades estructurales de los bosques están directamente relacionadas con su madurez y, por ende, con la provisión de servicios ecosistémicos (Felipe-Lucia *et al.*, 2018). Muchas de estas propiedades estructurales hacen alusión a los patrones en la distribución espacial de los árboles, siendo los atributos más utilizados para estimar la madurez forestal. En este sentido, la tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) resulta sumamente interesante por su capacidad para generar información tridimensional útil para la estimación de variables empleadas en aplicaciones forestales. Más concretamente, los dispositivos LiDAR

terrestres como el escáner láser terrestre (TLS) están mostrando un gran potencial para su implementación en inventario forestal (IF), incluyendo la evaluación de las características estructurales y por lo tanto de madurez forestal (Seidel *et al.*, 2013).

Esta tesis doctoral constituye un trabajo de investigación original que tiene como principal objetivo la evaluación y modelización de la madurez forestal con datos de IFNs. Otro de los objetivos principales fue explorar el potencial del TLS como dispositivo de estimación y monitorización de los parámetros de madurez planteados, para lo cual se desarrolló el paquete de R FORTLS (Molina-Valero *et al.*, 2022a), capaz de automatizar el procesado de datos pertenecientes a dispositivos terrestres de tecnología LiDAR.

2. Materiales y métodos

Los principales bosques estudiados en esta tesis doctoral se corresponden con las tipologías pertenecientes a hayedos (*Fagus sylvatica* L.), abetales (*Abies alba* Mill.), sus formaciones mixtas de hayedo-abetales, pinares de pino marítimo de la zona atlántica (*Pinus pinaster* ssp. *atlantica* H. de Vill.) y pino albar (*Pinus sylvestris* L.).

Bosques maduros de España

Todos los boques muestreados dentro de esta categoría fueron seleccionados en base a criterios de bosques maduros (p. ej. presencia de árboles viejos). También se consideró como criterio esencial la ausencia de perturbaciones severas y una fracción de cabida cubierta lo más alta posible con el objetivo de representar su máximo stock de biomasa. Se consiguieron identificar un total de 143 parcelas y cubrir un gradiente latitudinal amplio a nivel nacional *(Fig. 3)*. Estas parcelas representan la base de datos del proyecto FORESCHANGE (2016).

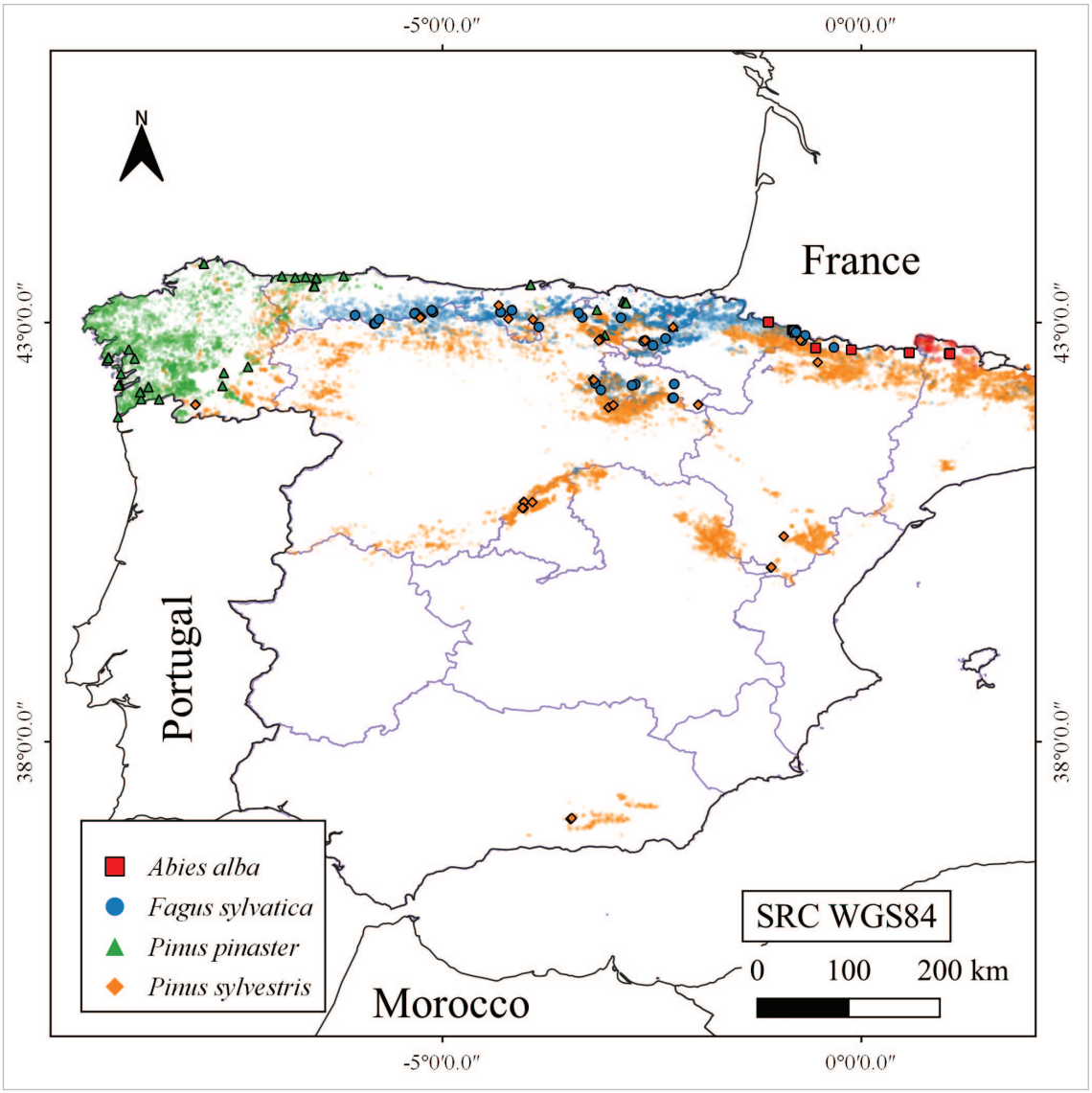


Figura 3. Localización de las parcelas de bosques maduros pertenecientes al proyecto FORESCHANGE. Las áreas sombreadas representan la distribución de estas especies según el Mapa Forestal Español.

2.1. Estimación de la calidad de estación

Para este objetivo se utilizó una red de parcelas permanentes de *P. radiata* del noroeste de España. Con estos datos se ajustaron curvas de calidad de estación para el índice de sitio (*SI*) —altura dominante a una edad de referencia—, e índice de forma (*SF*) —altura dominante para un diámetro dominante de referencia— (Vanclay & Henry, 1988). Una vez validado el *SF* en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, este se ajustó para los bosques de estudio en los casos en los que no existían modelos previos. Las metodologías empleadas puedes consultarse en Molina-Valero *et al.*, (2019; 2022b).

2.2. Estimación del máximo stock de biomasa

Para validar la hipótesis de que el máximo stock de biomasa (*MBS*, evaluado en esta tesis en base a la biomasa de los árboles vivos) se alcanza con grados de madurez anteriores a los más altos (p. ej. old-growth), se trabajó con hayedo-abetales pirenaicos, ya que formaban la base de datos que cubría el mayor rango de madurez (desde bosques maduros hasta old-growth). En primer lugar, se estimó el grado de madurez (conocido como naturalness score -*NS*-) de cada parcela mediante indicadores crono-funcionales obtenidos a partir de datos dendrocronológicos. El estudio de estos indicadores mediante un análisis de componentes principales permitió ordenar las parcelas en función de su grado de madurez. Después, se contrastó el stock de biomasa de estas parcelas maduras con todas las parcelas del IFN correspondientes a las mismas tipologías de bosques. Para esto se tuvieron en cuenta sus calidades de estación, estimadas mediante el *SF* previamente validado. Posteriormente, se estableció el *MBS* para cada tipo de bosque en base a la curva logarítmica *MBS~SF* ajustada mediante regresión cuantílica (percentil 97.5) en el gráfico de dispersión de biomasa frente a *SF*. Finalmente, esta curva permitió obtener el stock de biomasa relativo (*BS*(%)) con respecto al potencial máximo, y evaluar si hay relación entre el *BS*(%) y el *NS*; para así probar la hipótesis de que los bosques maduros alcanzan el *MBS* antes de llegar a los estados de madurez más altos.

2.3. Modelización del estado de madurez mediante el escáner láser terrestre

En este objetivo se exploró el potencial de las métricas y variables generadas por

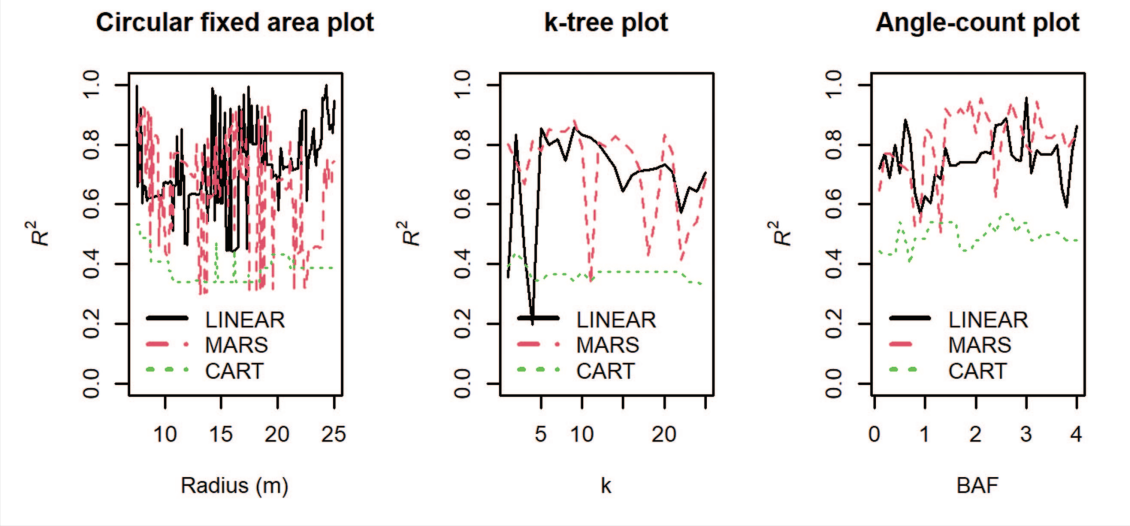


Figura 4. Evaluación de la estimación del grado de madurez en base a modelos predictivos. En el eje y se observa el valor del estadístico R^2, y en el eje el tamaño de parcela definido por las unidades correspondientes a cada diseño de parcela. Los diseños de parcela son: parcela circular de área fija, k-tree y relascópica (de izquierda a derecha).

el paquete de R FORTLS (desarrollado en esta tesis) para ajustar modelos predictivos de parámetros de madurez forestal como el *NS*. Para ello se evaluaron modelos lineales múltiples (MLR), regresión spline adaptativa multivariante (MARS), y árboles de clasificación y regresión (CART). Todos estos métodos se emplearon para diferentes diseños (circular de área fija, k-tree y relascópica) y tamaño. La idoneidad de los modelos y el diseño de parcela para cada variable se evaluó en base al estadístico R^2 *(Fig. 4)*.

3. Resultados y discusión

3.1. Estimación de la calidad de estación

La bondad del ajuste del índice de forma (*SF*) fue similar a la del índice de sitio (*SI*) para este caso de estudio en plantaciones de *P. radiata*. Esto puede observarse en la significación de los estadísticos y parámetros estimados *(Tab. 1)*, así como en la trayectoria de las curvas de calidad de estación, que describen de forma adecuada la tendencia de los datos en ambos casos *(Fig. 5)*. El buen desempeño de las propiedades deseables que cualquier índice de calidad de estación debe cumplir puede verse en Molina-Valero *et al.*, (2019). Los resultados del ajuste del *SF* además fueron de calidad similar o superior a los que pueden encontrarse en trabajos previos (Beltran *et al.*, 2016).

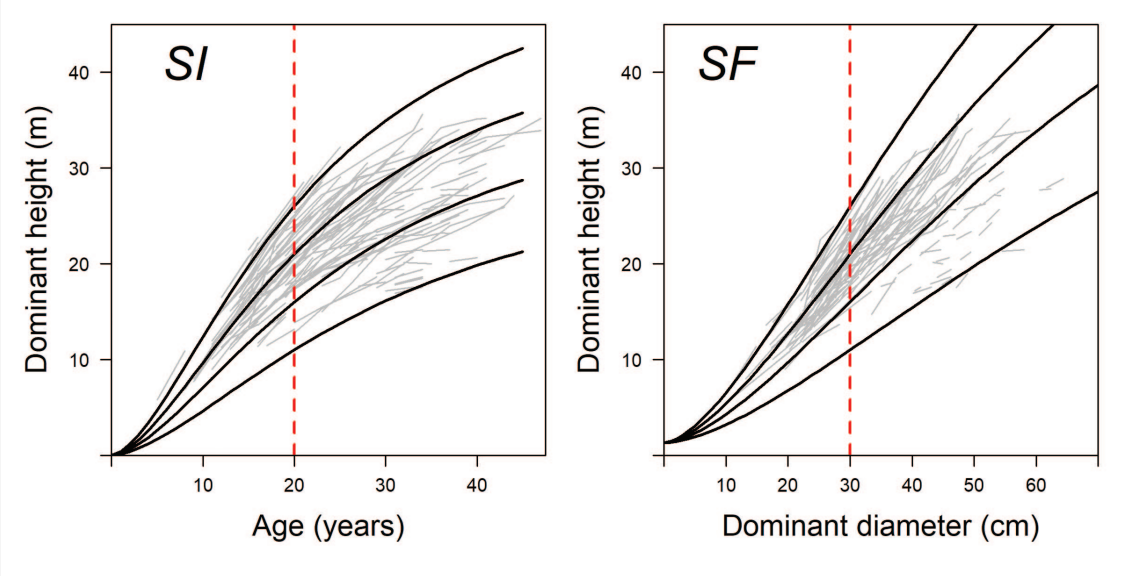


Figura 5. Familias de curvas para el índice de sitio (*SI*) e índice de forma (*SF*). Están referidas a las alturas dominantes de 11, 16, 21 y 26 m a una edad de referencia de 20 años y un diámetro dominante de referencia de 30 cm, respectivamente. Las curvas están superpuestas sobre las trayectorias de los datos de parcelas permanentes utilizados para el ajuste.

Tabla 1. Ecuaciones dinámicas ajustadas para *SI* y *SF* , parámetros estimados y estadísticos de ajuste.

Modelo base (Hossfeld IV)	Parámetros específicos del sitio	Ecuación dinámica (metodología GADA)	Parámetros estimados		p-valor	R^2_{adj}	$RECM$ (m)
$Y = \frac{a_1}{1 + a_2 t_{D_0}^{-a_3}}$	$a_1 = X$ $a_2 = b_2/X$ $a_3 = b_3$	$SI = \frac{X_0}{1 + \frac{b_2}{X_0} t_0^{-b_3}}$;	b_2	8059	$2 \cdot 10^{-16}$	0.988	0.634
		$X_0 = \frac{1}{2}\left[Y_0 + \sqrt{{Y_0}^2 + 4 b_2 Y_0 t_0^{-b_3}}\right]$	b_3	1.62	$2 \cdot 10^{-16}$		
		$SF = 1.3 + \frac{X_0}{1 + \frac{b_2}{X_0} {D_0}_{ref}^{-b_3}}$;	b_2	83199	$2 \cdot 10^{-16}$	0.986	0.687
		$X_0 = \frac{1}{2}\left[(Y_0 - 1.3) + \sqrt{(Y_0 - 1.3)^2 - 4 b_2 {D_0}_{ref}^{-b_3}(1.3 - Y_0)}\right]$	b_3	1.61	$2 \cdot 10^{-16}$		

3.2. Estimación de la madurez forestal en términos del stock de biomasa

Para el caso estudiado en esta tesis, se demostró la hipótesis de partida de que los bosques maduros pueden alcanzar el *MBS* con grados de madurez inferiores a los más altos. En este sentido, el índice de naturalidad *NS* funcionó según lo esperado, mostrando los valores máximos para los sitios consideradas en la literatura como old-growth (Bosque de Aztaparreta) y long-untouched (Bosque de Lizardoia) *(Fig. 6)*. Estos hallazgos han sido muy relevantes en el desarrollo de esta tesis doctoral, permitiendo estimar el gradiente de madurez forestal de forma cuantitativa y así estudiar el comportamiento de parámetros como el stock de biomasa en función del grado de madurez. Según nuestra hipótesis de partida, habría un límite máximo de este stock definido por estados de madurez altos sin grandes perturbaciones, y creciente a medida que aumenta la calidad de estación hasta llegar a un comportamiento asintótico *(Fig. 7 izquierda)*. En este sentido, el ajuste de los modelos de *MBS (Fig. 8)* sirvió para hacer la comparación del stock de biomasa relativo *BS*(%) con el *NS*, sin observarse relación entre ambos, siendo a veces el *BS*(%) mayor para valores de *NS* menores *(Fig. 7 derecha)*. Por lo tanto, el *BS*(%) puede alcanzarse con grados de madurez anteriores al de old-growth para las formaciones aquí estudiadas, lo cual está en línea con los hallazgos encontrados en otros trabajos en bosques similares (Meyer *et al.*, 2021).

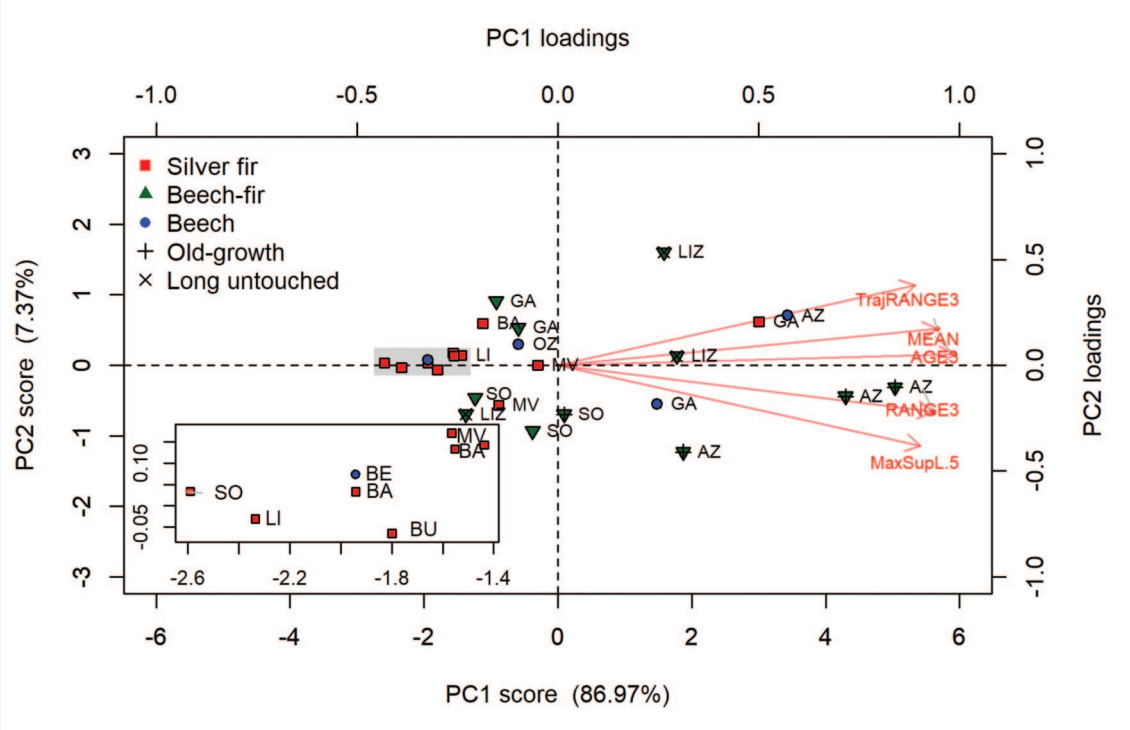


Figura 6. Análisis de componentes principales (PCA) con los indicadores crono-funcionales más adecuados para estimar la madurez en abetales, hayedos y hayedo-abetales pirenaicos. Las parcelas se ubican según sus posiciones relativas basadas en los componentes principales uno (PC1) y dos (PC2). Los valores sobre la PC1 representan el grado de naturalidad o madurez (*NS*) de las parcelas. Los "loadings" sobre las componentes principales representan las correlaciones entre los indicadores crono-funcionales y los componentes principales. *AGE*3 = edad media de los tres árboles más viejos; *MEAN* = edad media de los árboles que forman el dosel; *RANGE*3 = rango entre la media de los 3 árboles más jóvenes y los 3 más viejos; *TrajRANGE*3 = rango entre la media de los 3 árboles más jóvenes y los 3 más viejos cuando las trayectorias de crecimiento alcanzan un *d* = 37.5 cm. *MaxSupL.*5 = duración media de las 5 fases de supresión más largas. Los grados de madurez más altos corresponden con los bosques de Aztaparreta (AZ), Lizardoia (LIZ) y Gamueta (GA).

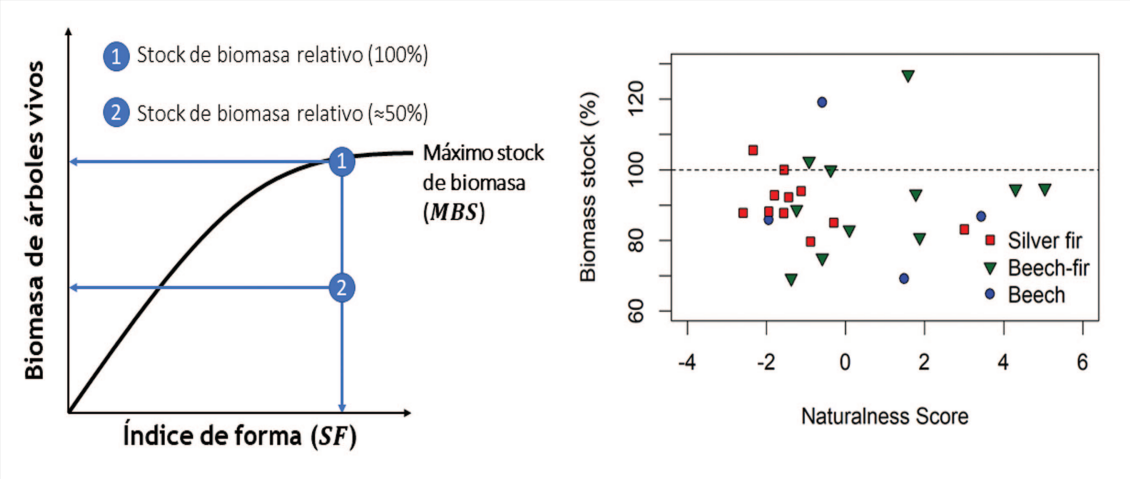


Figura 7. Esquema del concepto de máximo stock de biomasa (*MBS*) (izquierda) y representación del stock de biomasa relativo (*BS*(%)) con respecto al grado de madurez o *naturalness score* (derecha). Los puntos 1 y 2 de la figura de la izquierda representan dos sitios hipotéticos que, para una misma calidad de estación, estimada por el índice de forma (*SF*), muestran valores de *BS*(%) diferentes. La figura de la derecha muestra como el *BS*(%) máximo (en torno al 100%) se alcanza para grados de madurez más bajos que los máximos de esta base de datos (los cuales incluyen estados de old-growth).

Este análisis se extendió al resto de los bosques estudiados, observándose que las parcelas de bosques maduros normalmente alcanzaban valores máximos de biomasa frente a los datos del IFN para valores similares de *SF (Fig. 8)*. Por consiguiente, pudo obtenerse el *BS*(%) para todas las parcelas del IFN mediante el ajuste de las curvas de *MBS* y así hacer una evaluación de este parámetro a nivel nacional, el cual alcanzó valores medios próximos al 40% en todos los bosques excepto en hayedos donde el *BS*(%) es algo superior (~50%). Sin embargo, para algunas de las formaciones, como es el caso del pino marítimo, el modelo no mostró buenos estadísticos de ajuste *(Tab. 2)*. La interpretación de este mal ajuste se justifica por la ausencia de datos para las calidades de estación más altas *(Fig. 8 c)*. Esto es algo bastante razonable para esta especie porque:

1. Es una especie muy gestionada y por lo tanto es raro encontrar parcelas tan maduras en las zonas de mayor calidad, que suelen ser las más gestionadas.

2. Es una especie que sufre muchos incendios forestales, especialmente en la zona de estudio (noroeste peninsular), reduciéndose por tanto la probabilidad de alcanzar estados de madurez lo suficientemente altos como para representar bien el *MBS*.

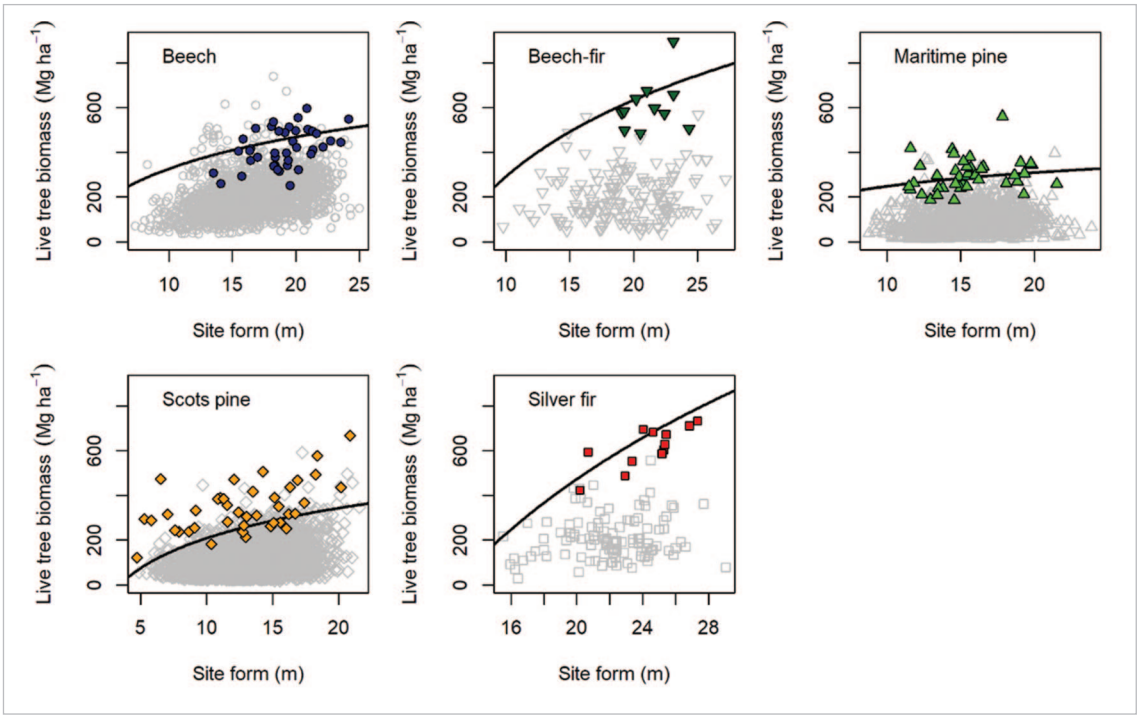


Figura 8. Modelos del máximo stock de biomasa (*MBS*). Las gráficas se corresponden con: (a) hayedos (beech, círculos), (b) hayedo-abetales (beech-fir, triángulos invertidos), (c) pino marítimo (maritime pine, triángulos), (d) pino albar (Scots pine, rombos), y (e) abetales (silver fir, cuadrados). Los puntos grises vacíos representan los datos del IFN y los puntos coloreados los de las parcelas maduras.

Tabla 2. Ecuaciones de los modelos de máximo stock de biomasa (*MBS*)

Especies principales	Parámetros			Cuantil (%)	Regresión logarítmica
	Estimaciones	Error estándar	p-valor		
Haya (Beech)	a = -145.41 b = 204.82	200.70 70.86	0.469 0.004	97.5	$MSB = a + b \cdot \log(SF)$
Hayedo-abetal (Beech-fir)	a = -845.35 b = 493.65	321.93 114.48	0.009 0.000	97.5	
Pino marítimo (Maritime pine)	a = 44.63 b = 88.18	257.66 94.31	0.862 0.350	97.5	
Pino albar (Scots pine)	a = -236.72 b = 193.41	25.25 10.09	0.000 0.000	97.5	
Abeto (Silver fir)	a = -2558.81 b = 1012.03	318.66 105.62	0.000 0.000	97.5	

3.3. Modelización del estado de madurez mediante el TLS

Las métricas y variables generadas por FORTLS han resultado ser útiles para la modelización de variables complejas como el *NS*, siendo los modelos MARS los que mostraron mejores ajustes. En cuanto al diseño de parcela, la parcela relascópica es la que presentó mejores resultados en el ajuste de un modelo predictor para el *NS*, con una correlación de Pearson entre los valores reales y predichos de 0.97 *(Fig. 9)*. Estos resultados son muy relevantes para la monitorización de la madurez forestal, ya que se trata de una base de datos que incluye los valores de madurez más altos posibles como es el perteneciente a los bosques old-growth.

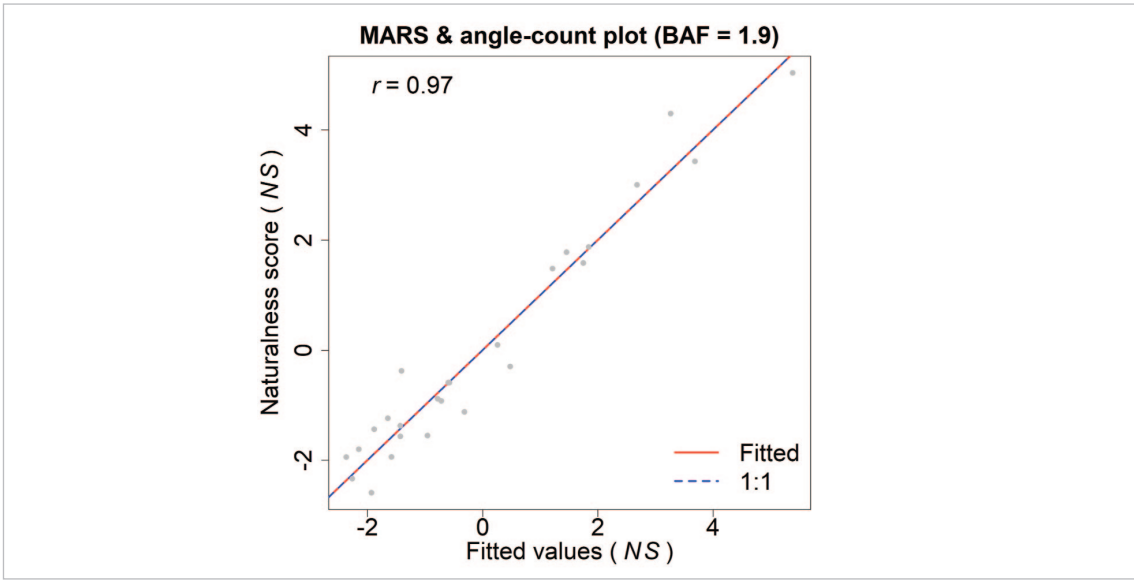


Figura 9. Gráfico de dispersión entre los valores del *naturalness score* (*NS*) estimados a partir de indicadores cronofuncionales a nivel de parcela, y los valores de *NS* predichos mediante un modelo MARS para un diseño de parcela relascópica de BAF = 1.9. La línea roja representa el ajuste de regresión lineal simple entre ambos valores (reales frente a predichos), y la línea azul discontinua la relación 1:1. *r* = correlación de Pearson.

4. Conclusiones

El índice de forma (*SF*) ha demostrado ser un índice de calidad de estación adecuado, con la principal ventaja de ser también viable en masas irregulares. Esto ha permitido utilizar el *SF* en los bosques objeto de estudio de esta tesis doctoral, con edad desconocida y estructuras irregulares en muchos casos. Con respecto a la hipótesis de si las masas maduras alcanzan el máximo stock de biomasa (*MBS*), se demostró para parcelas maduras de hayedo-abetales del Pirineo que grados de madurez previos a los más altos pueden alcanzar los valores máximos de stock de biomasa. Estos hallazgos permitieron estimar el stock de biomasa con respecto al *MBS* en función de la calidad de estación, utilizando los datos del IFN, y evaluan-

do así el stock de biomasa relativa (*BS*(%)) almacenada a nivel nacional. Por último, el paquete de R FORTLS ha confirmado su utilidad en el procesado y análisis de datos pertenecientes a escaneos únicos del escáner láser terrestre (TLS), permitiendo modelizar variables complejas como el grado de naturalidad (*NS*).

Agradecimientos/Financiación

Juan Alberto Molina-Valero ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades mediante la concesión de una ayuda para la formación del profesorado universitario (FPU 16/03057). Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto nacional *"Modelización del efecto de la intensidad de perturbación sobre la estructura y el stock de carbono en masas naturales a partir del Inventario Forestal Nacional"* (AGL2016-76769-C2-2-R), el cual ha sido concedido y financiado por la Agencia Estatal de Investigación.

6. Bibliografía

Beltran, H.A.; Chauchard, L.; Velásquez, A.; Sbrancia, R.; Pastur, G.M.; (2016). Diametric site index: an alternative method to estimate site quality in Nothofagus obliqua and N. alpina forests. *Cerne*, *22*, 345–354. https://doi.org/10.1590/01047760201622032207

Chiarucci, A.; Piovesan, G.; (2020). Need for a global map of forest naturalness for a sustainable future. Conservation Biology, 34(2), 368-372. https://doi.org/10.1111/cobi.13408

Felipe-Lucia, M.R.; Soliveres, S.; Penone, C.; Manning, P.; van der Plas, F.; Boch, S.; Allan, E.; (2018). Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nature communications*, *9*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07082-4

Ford, S.E.; Keeton, W.S.; (2017). Enhanced carbon storage through management for old_growth characteristics in northern hardwood_conifer forests. *Ecosphere*, 8(4), e01721. https://doi.org/10.1002/ecs2.1721

FORESCHANGE (2016). *Modelización del efecto de la intensidad de perturbación sobre la estructura y el stock de carbono en masas naturales a partir del Inventario Forestal Nacional* (AGL2016-76769-C2-2-R). Agencia Estatal de Investigación cofinanciado por FEDER

Grassi, G.; House, J.; Dentener, F.; Federici, S.; den Elzen, M.; Penman, J.; (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. Nature Climate Change, 7(3), 220-226. https://doi.org/10.1038/nclimate3227

Luyssaert, S.; Schulze, E.; Börner, A.; Knohl, A.; Hessenmöller, D.; Law, B.E.; Grace, J.; (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, *455*(7210), 213-215. https://doi.org/10.1038/nature07276

Meyer, P.; Nagel, R.; Feldmann, E.; (2021). Limited sink but large storage: Biomass dynamics in naturally developing beech (Fagus sylvatica) and oak (Quercus robur, Quercus petraea) forests of north_western Germany. *Journal of Ecology*, *109*(10), 3602-3616. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13740

Molina-Valero, J.A.; Diéguez-Aranda, U.; Álvarez-González, J.G.; Castedo-Dorado, F.; Pérez-Cruzado, C.; (2019). Assessing site form as an indicator of site quality in even-aged Pinus radiata D. Don stands in north-western Spain. *Annals of Forest Science*, *76*(4), 1-10. https://doi.org/10.1007/s13595-019-0904-1

Molina-Valero, J.A.; Camarero, J.J.; Álvarez-González, J.G.; Cerioni, M.; Hevia, A.; Sanchez-Salguero, R.; Martin-Benito, D.; Perez-Cruzado, C.; (2021). Mature forests hold maximum live biomass stocks. *Forest Ecology and Management*, *480*, 118635. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118635

Molina-Valero, J.A.; Martínez-Calvo, A.; Villamayor, M.J.G.; Pérez, M.A.N.; Álvarez-González, J.G.; Montes, F.; Pérez-Cruzado, C.; (2022a). Operationalizing the use of TLS in forest inventories: The R package FORTLS. *Environmental Modelling & Software*, *105337*. https:// doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105337

Molina-Valero, J.A.; (2022b). *Modelling forest stand maturity from National Forest Inventory and terrestrial laser scanning data*. Tesis doctoral. Universidade de Santiago de Compostela). http://hdl.handle.net/10347/29427

Seidel, D.; Leuschner, C.; Scherber, C.; Beyer, F.; Wommelsdorf, T.; Cashman, M.J.; Fehrmann, L.; (2013). The relationship between tree species richness, canopy space exploration and productivity in a temperate broad-leaf mixed forest. *Forest Ecology and Management*, *310*, 366-374. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.058

Vanclay, J.K.; Henry, N.B.; (1988). Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland. *The Commonwealth Forestry Review*, *67*(1), 53–64. https://www.jstor.org/stable/42608428

Wirth, C.; Gleixner, G.; Heimann, M.; (Eds.) (2009). Old-growth forests: function, fate and value - an overview. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_1