



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-176

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Evaluación de los itinerarios de gestión forestal ORGEST para pino silvestre y la encina bajo distintos escenarios de cambio climático

NADAL-SALA, D.¹, SABATÉ, S.^{1,2}, PALERO, N.³, CERVERA, T.³ y GRACIA, C.A.^{1,3}

1 Departamento de Biología Evolutiva, Ecología y Ciencias Ambientales. Diagonal 643. Barcelona, 08028.

2 CREAM (Centro de Recerca en Ecología y Aplicaciones Forestales). Campus de Bellaterra (UAB) Edifici C. Cerdanyola del Vallès, 08193

3 CPF (Centro de la Propiedad Forestal). Carretera B-140 de Sabadell, km 4,5, Finca Torreferrussa. Santa Perpètua de Mogoda, 08130

Resumen

Los itinerarios de gestión forestal ORGEST son un conjunto de actuaciones silvícolas preestablecidas desarrollados en Catalunya para la gestión de distintas masas forestales con distintos objetivos de gestión. Los criterios de actuación en los modelos ORGEST se establecen en relación a unas condiciones ambientales que en el actual contexto de cambio climático se verán alteradas. El objetivo de este estudio es evaluar y comparar algunos de los itinerarios ORGEST para el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y la encina (*Quercus ilex* L.), bajo distintos escenarios de cambio climático, para un conjunto de variables objetivo, y para una misma parcela. Para ello, se ha utilizado el modelo de simulación de crecimiento forestal GOTILWA+. Se observa que en un escenario de cambio climático moderado los bosques de ambas especies ven reducido su stock de carbono. En el caso de un escenario de cambio climático más extremo, por contra, se observa como el bosque de *Q. ilex* aumenta su stock de carbono. El bosque de *P. sylvestris*, si bien en un inicio incrementa la capacidad de almacenar carbono, al final dicho incremento termina siendo contrarrestado por el aumento en aridez. Los distintos itinerarios de gestión aplicados incrementan entre un 60-90% la producción primaria neta (PPN), siendo los itinerarios de turno más corto los que más la incrementan. Los itinerarios de *Q. ilex* no modifican su transpiración de forma sensible, mientras que, para un bosque gestionado de *P. sylvestris*, se proyecta una reducción de la transpiración de entre un 4 - 10%. Además, para *P. sylvestris*, se proyecta una extracción anual de madera de 3,1-4,3 m³·ha⁻¹·año⁻¹ (itinerarios largo y corto, respectivamente) para un escenario climático actual, con una reducción del 25-15% en un escenario de clima moderado, y un incremento del 15-40% en un escenario de cambio extremo. Para *Q. ilex*, la extracción anual es de 1,6-2,3 m³·ha⁻¹·año⁻¹, con una reducción del 40-45% en condiciones de cambio climático moderado, y un aumento del 35-40 % en el escenario de cambio climático más extremo. Los itinerarios de turno más largo reducen la vulnerabilidad de la masa forestal a los incendios más que los de turno más corto. Escenarios de cambio climático más extremos incrementan, en ambas especies, su vulnerabilidad a los incendios. Los itinerarios de turno más corto, por contra, tienen valores superiores de producción neta por unidad de agua transpirada, y menor respiración de mantenimiento en relación a su producción. Dicha tendencia se mantiene en condiciones de cambio climático, aunque en el caso del pino la eficiencia de la gestión baja en condiciones de cambio climático, tanto moderado como extremo. Se concluye que, a parte de las características ambientales de la parcela, un gestor forestal debe de tener en cuenta también las proyecciones de cambio climático a la hora de determinar la gestión óptima, de un rodal.

Palabras clave

Eficiencia en el uso del agua, fertilización por CO₂, gestión forestal óptima, GOTILWA+, limitación hídrica de la producción

1. Introducción

El crecimiento de los bosques mediterráneos se encuentra actualmente sujeto a severas restricciones debido al estrés hídrico estival característico del clima mediterráneo (PALAHÍ *et al.* 2008). Por si fuera poco, las perspectivas del actual cambio climático de origen antropogénico (IPCC 2013), no resultan muy halagüeñas para los bosques mediterráneos de la Península Ibérica. En dicha zona se prevé un incremento de la aridez debido tanto a un aumento de las temperaturas promedio

como a una reducción de la precipitación estival (VAUTARD *et al.* 2014). Condiciones más áridas pueden suponer desde reducciones en la producción forestal (VAYREDA *et al.* 2012), hasta extensos y generalizados eventos de mortalidad arbórea (ALLEN *et al.* 2015). Los bosques mediterráneos, aun dejando de lado su intrínseco valor ecológico, proveen a la sociedad de un conjunto de bienes y servicios fundamentales, tales como la madera y los productos forestales no madereros y el incremento de la calidad del agua, entre otros (MERLO y BRIALES 2000). Dichos servicios ecosistémicos pueden verse afectados por un empeoramiento de las condiciones del bosque. En la zona estudiada por el presente trabajo, evidencias recientes apuntan a una progresiva expansión de la encina en detrimento del pino silvestre (GALIANO *et al.*, 2010; AGUADÉ *et al.*, 2015), en aquellos pinares donde las restricciones hídricas se vuelvan más acusadas y continuadas.

Una de las opciones que tiene la sociedad para tratar de mitigar los efectos adversos del cambio climático sobre los bosques mediterráneos es la gestión forestal (LÓPEZ *et al.*, 2009); es decir, la planificación y aplicación de un conjunto de actuaciones silvícolas sobre una masa forestal para adecuarla a unos objetivos de gestión preestablecidos. Los itinerarios ORGEST son una iniciativa de la Generalitat de Catalunya y el Centro de la Propiedad Forestal de Catalunya, para sistematizar las distintas gestiones forestales aplicables en Catalunya. Éstos se basan en: i) la especie a gestionar, ii) la calidad de la parcela, basada en la pluviometría y la tipología del suelo, y iii) el objetivo de dicha gestión. No obstante, al estar basados en relaciones estadísticas obtenidas a partir de los datos del Inventario Forestal y Ecológico de Catalunya (GRACIA *et al.*, 2004), dichos itinerarios representan únicamente una fotografía instantánea de las relaciones entre condiciones ambientales y crecimiento forestal, ya que no incluyen la progresiva modificación de las condiciones del entorno debidas al cambio climático. Precisamente, como algunos de los itinerarios descritos llegan a los 150 años de turno, es necesaria una re-evaluación de dichos itinerarios para asegurar, antes de elegir el tipo de gestión, que el itinerario ORGEST idóneo en unas condiciones climáticas estáticas para una parcela lo siga siendo en unas condiciones climáticas cambiantes.

2. Objetivos

En este trabajo se evalúan y comparan tres itinerarios de gestión forestal de distinto turno de tala para pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), y tres más para la encina (*Quercus ilex* L.), para una misma parcela forestal y bajo distintas condiciones de cambio climático. Dichos itinerarios de gestión se evalúan en función de cuatro variables objetivo (i.e. la fracción de agua evapotranspirada relativa a la precipitación, la producción primaria bruta respecto a la respiración de mantenimiento, la producción neta por unidad de agua transpirada, y el riesgo de incendios). Se han elegido el pino silvestre y la encina debido a que, en la zona de estudio, sus poblaciones tienden a colindar y, por lo tanto, a competir.

Mediante este estudio se pretende testar que:

- i) Se esperan unos impactos más negativos del cambio climático sobre los pinares que sobre los encinares, de haberlos, debido a la mayor vulnerabilidad del pino silvestre al incremento de aridez.
- ii) La gestión forestal tendrá un mayor impacto en los balances hídricos de los pinares.
- iii) Los itinerarios de turno más corto para ambas especies redundarán en una mayor producción anual de madera y una mayor eficiencia en el uso del agua.
- iv) Los itinerarios de turno más largo generarán masas forestales más resistentes a los incendios, a costa de reducir su eficiencia en el uso del agua y su producción de madera.

3. Metodología

3.1 Simulaciones de crecimiento forestal, características del rodal, climáticas y de gestión

Se ha simulado el crecimiento de un regenerado de pino silvestre y un regenerado de encina bajo distintas condiciones de cambio climático y distintos itinerarios de gestión forestal. Para reducir

la incertidumbre, y debido a que tienden a coexistir en la ubicación seleccionada, se ha considerado la misma parcela para ambas especies. Las simulaciones se han llevado a cabo mediante el modelo de crecimiento forestal GOTILWA+ (*Growth of Trees Is Limited by Water*, <http://www.creaf.uab.cat/gotilwa/>, GRACIA *et al.* 2004, FONTES *et al.* 2010; NADAL-SALA *et al.* 2014; NADAL-SALA *et al.* (en prensa, a)). Brevemente, GOTILWA+ es un modelo de simulación forestal del crecimiento de parcelas mono específicas, que calcula los distintos procesos relacionados con el ciclo del carbono y el agua en el bosque de forma horaria, y los integra a escala diaria, mensual y anual. GOTILWA+ permite simular el crecimiento de la masa forestal bajo distintas condiciones climáticas, así como bajo distintos regímenes de gestión. A continuación, se listan las características consideradas para las simulaciones realizadas:

- i) **Parcela forestal:** La parcela forestal seleccionada se encuentra en las montañas de Prades, en la provincia de Tarragona, en el noreste de la Península Ibérica (41,29° N, 1,06E, 550 m.s.n.m). Se ha seleccionado dicho entorno debido a que la interacción de los bosques de *P. sylvestris* y *Q. ilex* de la zona de las Montañas de Prades ha sido largamente estudiada y descrita (p. ej. GALIANO *et al.* 2010; AGUADÉ *et al.* 2015). Debido a que el crecimiento del bosque está estrechamente ligado a la capacidad de retención hídrica del suelo (Nadal-Sala *et al.*, (en prensa, b)), se ha optado por una profundidad del suelo de 1 m, con un 10% de pedregosidad; es decir, una calidad del suelo alta según los criterios ORGEST, para la parcela a simular.
- ii) **Datos climáticos:** A partir de los datos climáticos descritos para la zona estudiada durante el período 1951-2010 (NINYEROLA *et al.* 2007a; 2007b), se ha obtenido, mediante el generador de clima disponible en el modelo GOTILWA+, una serie meteorológica de 150 años de longitud. Dicha serie mantiene los promedios mensuales y las auto-correlaciones temporales de radiación, precipitación y temperatura de los datos originales. A esta serie se la ha llamado la Serie Meteorológica de Referencia (SMR). Dicha serie presenta una concentración de CO₂ fija a los valores del primer año de simulación (año 2012, 393 ppm). Siguiendo la tabla 1, se ha estresado dicha serie climática en función del escenario climático considerado - un escenario de forzamiento climático más moderado, el RCP2.6, y un escenario de forzamiento climático más extremo, el RCP8.5 (IPCC, 2013) -, hasta el año 2100 (año 89 de la simulación), momento a partir del cual no se ha considerado ningún incremento adicional del estrés sobre la SMR (Figura 1).

Tabla 1. Escenarios de cambio climático aplicados sobre la SMR en función de las proyecciones del IPCC (2013) para la zona de Poblet.

Escenario	Incremento de CO ₂ anual (ppm·año ⁻¹)	Anomalía en temperatura anual (°año ⁻¹)	Anomalía en precipitación anual (%año ⁻¹)
RCP0.0	0	0	0
RCP2.6	0,21	0,019	-0,21
RCP8.5	5,5	0,059	-0,33

- iii) **Gestión forestal:** A parte del itinerario sin gestión (SG), para cada especie se han seleccionado dos itinerarios de gestión forestal a partir de los itinerarios ORGEST, uno de ellos de turno corto y otro de turno largo (PIQUÉ *et al.*, 2011; VERICAT *et al.*, 2011). A fin de hacer las simulaciones comparables, si el turno de tala de una gestión terminaba antes de los 150 años, se volvía a aplicar dicha misma gestión a la parcela, con el mismo regenerado de 4000 pies·ha⁻¹, y así las veces necesarias para alcanzar los 150 años. Las distintas gestiones aplicadas se detallan en la tabla 2.

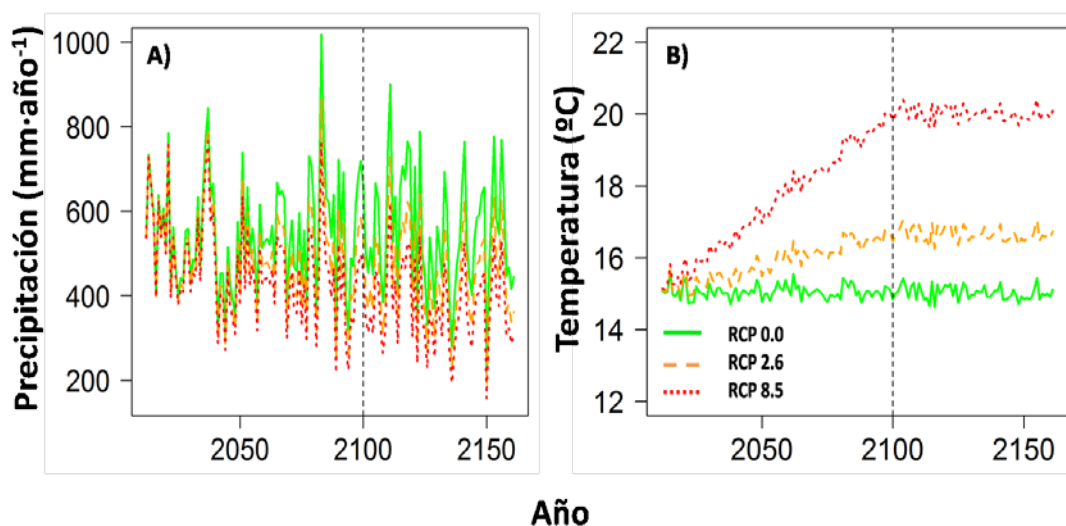


Figura 1. Series meteorológicas utilizadas para los tres distintos escenarios climáticos (RCP 0.0, RCP 2.6 y RCP 8.5). A) Indica la evolución de la precipitación anual ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) a lo largo de la serie considerada y B) indica la temperatura promedio anual ($^{\circ}\text{C}$) de las series climáticas. Nótese que, a partir del año 2100 el forzamiento climático se mantiene estable

Tabla 2. Itinerarios de gestión simulados, para una parcela de calidad alta. Se indican la longitud del turno en años, el número de intervenciones, incluyendo la corta final de turno y el objetivo principal de la gestión.

Identificador ORGEST	Especie	Turno (años)	Número intervenciones	Objetivo ORGEST
Ps07	Pino silvestre	150	9	Riesgo incendios
Ps09	Pino silvestre	100	5	Producción madera
Qi02	Encina	35	2	Producción madera
Qi03	Encina	100	7	Riesgo incendios

3.2 Índices de evaluación

Con tal de evaluar los distintos impactos de los itinerarios de gestión sobre la masa forestal, se han considerado cuatro índices que permiten comparar los efectos de dichos itinerarios en distintas condiciones de cambio climático:

- i) **Producción neta por agua transpirada (PAT):** Peso de la producción primaria neta en relación al volumen de agua transpirada en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ agua.
- ii) **Fracción de la fotosíntesis que representa la respiración de mantenimiento (Rm/PPB):** Porcentaje de la producción primaria bruta que supone la respiración de mantenimiento, en %.
- iii) **Fracción de la precipitación transpirada (T/P):** Fracción de la precipitación que es anualmente transpirada por el bosque, en tanto por uno.
- iv) **Riesgo de incendios (RI):** Porcentaje de árboles muertos debido a incendios forestales cada año. Éste índice se obtiene multiplicando la probabilidad de incendio forestal por la probabilidad de muerte en caso de incendio forestal, ambas calculadas siguiendo a GONZÁLEZ *et al.* (2006).

4. Resultados y discusión

Las proyecciones indican que, en un escenario de cambio climático moderado, para cualquier especie y bajo cualquier itinerario de gestión, los bosques reducirán su capacidad de sumidero de carbono. Así, un incremento, aunque sea moderado, de la aridez, sin que vaya acompañado por un incremento significativo de la concentración atmosférica de CO_2 , repercutiría muy negativamente en la capacidad de sumidero de carbono de tanto *P. sylvestris* como *Q. ilex* (Figura 2). Por otro lado, en

un escenario de cambio climático más extremo, se aprecia un incremento de la capacidad de sumidero de los bosques tanto de *P. sylvestris* como de *Q. ilex* durante el siglo XXI. Debido al incremento de la concentración atmosférica de CO₂, se espera un incremento en la eficiencia en el uso del agua por parte de los árboles (KEENAN *et al.*, 2013). La tendencia resultante es que, en condiciones de alta concentración de CO₂ atmosférica, ambas especies incrementen su capacidad de sumidero de carbono. No obstante dicha tendencia, que si bien en *Q. ilex* continúa hasta el final de la simulación, en *P. sylvestris* se invierte a partir del año 2080, llegando a presentar valores inferiores de stock de carbono que en el escenario RCPO.0 a finales de la simulación. La explicación de este hecho es que, debido al progresivo aumento de la aridez, el estrés hídrico provocará que el bosque de *P. sylvestris* sufra mayores limitaciones en su crecimiento para finales de siglo XXI, limitaciones que compensarán y, finalmente, contrarrestarán el efecto fertilizador de la mayor concentración de carbono atmosférico. Es necesario recalcar aquí que éstas simulaciones no contemplan otras posibles limitaciones sobre el incremento de la eficiencia fotosintética a concentraciones crecientes de CO₂ atmosférico, tales como una posible limitación por carestía de nutrientes vinculados a la eficiencia fotosintética, como el N (NORBY *et al.*, 2010). Comparando entre especies, las proyecciones indican una mayor resiliencia al incremento de aridez por parte de los bosques de *Q. ilex* que los de *P. sylvestris*, como ya apuntaban GALIANO *et al.* (2010), pudiendo llegar a situaciones de progresiva regresión de los pinos en detrimento de las encinas, sobre todo en ausencia de gestión.

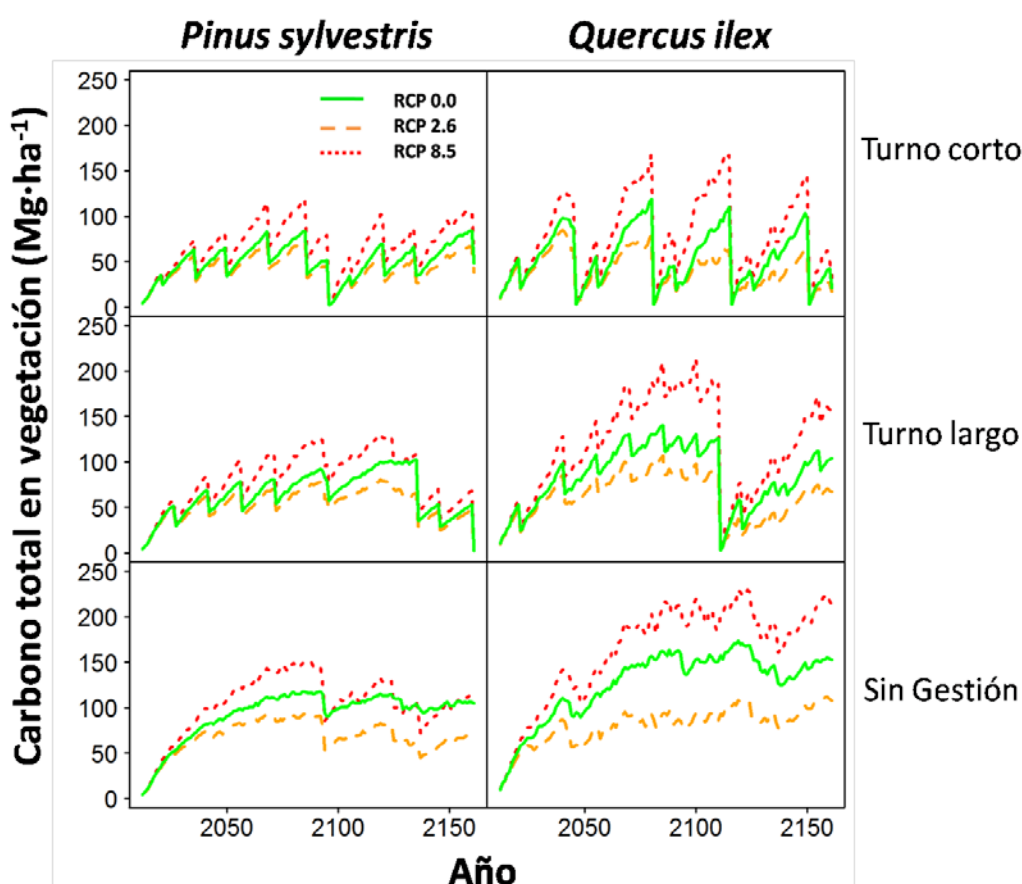


Figura 2. Evolución del carbono total acumulado en la vegetación a lo largo de los 150 años de simulación, para ambas especies i escenarios climáticos, y para las distintas gestiones (paneles superiores para una gestión de turno corto, intermedios para una gestión de turno largo e inferiores para un bosque sin gestionar).

En la tabla 3 se resumen los principales balances anuales de carbono y agua simulados. Se observa que para ambas especies, la Producción Primaria Bruta (PPB, en Mg·ha⁻¹·año⁻¹) resulta superior sin aplicar gestión en todos los escenarios climáticos, debido a que se mantiene la máxima

biomasa de hojas posible en equilibrio con el agua y energía disponibles. Respecto a los escenarios de cambio climático, se observa que en un escenario más moderado se reduce la PPB, mientras que un escenario de cambio climático más severo ésta aumenta, debido al previamente mencionado efecto fertilizante de una elevada concentración de CO₂ atmosférico. Es en el caso más moderado de cambio climático, al incrementar la aridez sin que esto vaya acompañado por un aumento significativo de la concentración de CO₂, cuando se observa la limitación en la PPB debido a restricciones por déficit hídrico. El impacto de la gestión, no obstante, resulta evidente en la Producción Primaria Neta (PPN, en Mg·ha⁻¹·año⁻¹). Al retirarse biomasa que respira, se reduce la respiración de mantenimiento del bosque y, por lo tanto, se reduce la fracción de la fotosíntesis necesaria para el mantenimiento de los tejidos del árbol. Así, para ambas especies, y para una gestión de turno corto, se puede casi doblar la PPN, independientemente del escenario climático considerado. Asimismo, en una gestión de turno largo, se incrementa entre un 30 y un 40 % la PPN, respecto al mismo rodal sin gestionar. Cabe destacar que, igual que como en la PPB, un escenario de cambio climático moderado resulta en una PPN inferior para el mismo itinerario de gestión, mientras que el escenario climático más extremo resulta en valores de PPN superiores. El incremento de la PPN indica un incremento de la capacidad de captación de carbono atmosférico, capacidad que ha sido descrita por HYVÖNEN *et al.* (2006), en la que se describe una mayor capacidad de sumidero de carbono para los bosques más jóvenes, con menos biomasa que respira. También VAYREDA *et al.* (2012) encontraron éste incremento de la capacidad de sumidero de carbono en los bosques gestionados al comparar la productividad de los bosques españoles gestionados y sin gestionar.

Tabla 3. Promedio de producción primaria bruta (PPB, Mg·ha⁻¹·año⁻¹), producción primaria neta (PPN, Mg·ha⁻¹·año⁻¹), Carbono en la vegetación (MgC·ha⁻¹), Transpiración (mm·año⁻¹), y extracción anual de madera (m³·ha⁻¹·año⁻¹). Se indican los valores para todos los itinerarios de gestión y todos los escenarios de cambio climático considerados.

		PPB (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)			PPN (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)			Carbono en vegetación (MgC·ha ⁻¹)			Transpiración (mm·año ⁻¹)			Extracción (m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)		
		rcp00	rcp26	rcp85	rcp00	rcp26	rcp85	rcp00	rcp26	rcp85	rcp00	rcp26	rcp85	rcp00	rcp26	rcp85
<i>Quercus ilex</i>	Q102 (corto)	34,3	29,4	45,3	11,4	9	15,3	54,5	40,2	79,2	416	403	379	2,3	1,4	3,2
	Q103 (largo)	34,1	29,4	45	9,6	7,8	12,8	84	61,9	118,7	415	404	377	1,6	1,1	2,2
	SG	36,2	30,1	46	6,3	6	8,2	126,9	80,9	165,2	426	407	381	0	0	0
<i>Pinus sylvestris</i>	Ps09 (corto)	21,4	20,2	32	6,5	5,7	8,7	50,4	43,3	67,9	294	312	297	5	4,3	6,9
	Ps07 (largo)	21,3	20,2	30,6	5,1	4,6	6,4	63,9	53,3	80,8	294	313	286	4,1	3,1	4,7
	SG	23,8	22,2	33,3	3,5	3,7	4,9	93,3	68,1	104,6	323	341	308	0	0	0

Los bosques sin gestionar almacenan más carbono en forma de biomasa en promedio que los bosques sometidos a gestión, para ambas especies y todos los escenarios climáticos. Cabe destacar aquí que, si bien los bosques sin gestionar presentan unos valores de stock de carbono promedio superiores durante toda la simulación, los itinerarios de gestión retiran entre 1-1,5 MgC·ha⁻¹·año⁻¹, dependiendo de la especie, el escenario climático y el itinerario de gestión aplicado. Dicho carbono, dependiendo de la vida útil de los productos madereros que resulten de su uso, debe de tenerse en cuenta a la hora de contabilizar la capacidad de sumidero de la gestión en sí (ERIKSSON *et al.*, 2007) y añadirla a la capacidad de sumidero del bosque. Se espera una mayor vida útil de los productos madereros obtenidos a partir del itinerario de turno largo del pino, ya que dichos productos es más probable que sean usados en la construcción de viviendas y/o postes de teléfonos (ERIKSSON *et al.*, 2007), más que para la generación de biomasa, destino mayoritario de la madera de encina, y que presenta un tiempo de retorno a la atmósfera muy inferior. Cabe destacar aquí, también, que las masas forestales sin gestionar también resultan más vulnerables a los incendios forestales (Tabla 4, Figura 3), casi el doble, en función del itinerario y el escenario climático. Dicha vulnerabilidad comporta que el carbono almacenado en estos bosques tenga una mayor probabilidad de ser liberado a la atmósfera debido a un incendio forestal.

En *Q. ilex*, la capacidad de modificación del volumen de agua que transpira un bosque es marginal para ambas gestiones consideradas - reducción de entre un 0-3 % de la transpiración anual, con unos valores absolutos de 377-416 mm-año⁻¹, en función del itinerario y el escenario climático-, y las simulaciones indican que aún será más difícil su modificación en cualquiera de los dos escenarios de cambio climático. En cambio, para *P. sylvestris*, una gestión de turno corto supone una reducción de entre un 4 y un 10 % de la transpiración del bosque, que oscila entre 286-323 mm-año⁻¹ dependiendo del escenario climático y el itinerario de gestión. Una gestión de turno largo supone una reducción de entre un 7 y un 10 % de la transpiración, dependiendo del escenario climático considerado. Así, la mayor reducción de la transpiración ocurriría en un contexto de clima actual, mientras que, a mayor intensidad del cambio climático, más se limita la posibilidad de reducir el volumen de agua transpirada mediante gestión. Al reducir la precipitación y, por lo tanto, al encontrarse el pinar en condiciones más limitantes durante un mayor período del año - ya que, paralelamente, el aumento de temperaturas incrementan la longitud del período vegetativo-, a mayor intensidad del cambio climático, menor es el margen disponible para el gestor para modificar la transpiración del pinar.

Los itinerarios de gestión de *P. sylvestris* permiten una extracción de 4,1-5 m³·ha⁻¹·año⁻¹ de madera, para un itinerario de turno largo y corto respectivamente, en las condiciones climáticas actuales. Asimismo, dicha extracción se reduce en un escenario de cambio climático moderado hasta los 3,1-4,3 m³·ha⁻¹·año⁻¹, lo que supone un 25-15% de reducción. No obstante, en un escenario de cambio climático extremo, dicha extracción anual se incrementa a 4,7-6,9 m³·ha⁻¹·año⁻¹, un aumento del 15-40% en los itinerarios de turnos largo y corto, respectivamente. Un incremento en producción superior en el itinerario de turno corto en un escenario extremo indica que, al mantener baja la biomasa del sistema, los efectos del cambio climático se notan menos al reducir el incremento de los costes de mantenimiento de la biomasa en forma de respiración acorde con el aumento de temperatura, mientras que, en un itinerario de turno largo, y baja intensidad de intervención, dicha respiración tiende a ser más elevada, notándose de esta forma los efectos tanto del incremento del estrés hídrico como de la mayor respiración de mantenimiento. Para *Q. ilex*, la extracción anual es de 1,6-2,3 m³·ha⁻¹·año⁻¹ para el itinerario largo y el corto, respectivamente, con una reducción del 40-45% en condiciones de cambio climático moderado, y un aumento del 35-40 % en el escenario de cambio climático más extremo. En este caso, al no sufrir un estrés hídrico tan acusado como *P. sylvestris*, en un escenario climático más extremo, el itinerario más largo de *Q. ilex* presenta valores porcentuales muy similares de incremento de la extracción a los del itinerario más corto. Cabe destacar que, si bien se extrae anualmente un volumen de madera muy superior en los itinerarios de *P. sylvestris* que en los de *Q. ilex*, si se corrige dicho volumen de madera por la densidad de la misma, los pesos obtenidos en ambas especies se asemejan mucho más, ya que la densidad de la madera, según GRACIA et al., (2004), de la encina es de 0,88 g·cm⁻³, muy superior a la del pino silvestre (0,53 g·cm⁻³).

Los valores obtenidos para los cuatro índices elegidos en un rodal sin gestionar se indican en la tabla 4. En ella se observa que, para un mismo escenario climático, un encinar produce un peso de madera superior por volumen de agua transpirada que un pinar (PAT de la encina 1,2-1,5 kg·m⁻³, 1-1,4 kg·m⁻³ el pino, en función del escenario climático), siendo superiores los valores en el caso del cambio climático más extremo debido al efecto fertilizador del CO₂ atmosférico. Ambas especies presentan unos porcentajes similares de fracción de la PPB consumida en respiración de mantenimiento (Rm), aunque en el caso de la encina la proporción es ligeramente superior en todos los escenarios (Rm/PPB = 0,73-0,76 kg·kg⁻¹ en el caso del pino, 0,76-0,78 kg·kg⁻¹ en el caso de la encina). La fracción de la precipitación que es transpirada por el bosque es superior en el encinar que en el pinar en todos los itinerarios de cambio climático (T/P = 0,8-0,92 mm·mm⁻¹ para la encina, y 0,62-0,76 mm·mm⁻¹ para el pino), ésta además aumenta a medida que las condiciones climáticas se vuelven más extremas. Esto es debido por un lado a la progresiva disminución de la precipitación anual en los escenarios de cambio climático, así como a una mayor demanda evaporativa por aumento de las temperaturas. Éste aumento supone por un lado más demanda evaporativa atmosférica, y por otro la prolongación del período vegetativo. Por último, recalcar que la fracción simulada de la precipitación

transpirada por el encinar es similar a la observada por GRACIA *et al.*, (1999), reportando valores cercanos a 0.85 para un encinar próximo al simulado.

Tabla 4. Valores de los cuatro indicadores para un bosque sin gestionar. Se indican la Producción Primaria Neta por volumen de Agua Transpirada (PAT, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), la fracción de la producción primaria bruta que supone la respiración de mantenimiento (Rm/PPB, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), la fracción de la precipitación que supone la transpiración (T/P, $\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$), y el porcentaje anual de pies muertos debido a incendio forestal (RI, %).

	Escenario	<i>Q. ilex</i>	<i>P. sylvestris</i>
PAT ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	RCP00	1,20	1,00
	RCP26	1,20	1,00
	RCP85	1,50	1,40
Rm/PPB ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RCP00	0,76	0,78
	RCP26	0,73	0,76
	RCP85	0,74	0,76
T/P ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)	RCP00	0,80	0,62
	RCP26	0,88	0,75
	RCP85	0,92	0,76
RI (%)	RCP00	0,38	0,49
	RCP26	0,40	0,54
	RCP85	0,52	0,61

Las coníferas en general presentan una mayor inflamabilidad que las encinas (BOND y VAN WILGEN, 1996), debido a su grande contenido en resina y aceites esenciales, comparados con las encinas. A esto cabe añadir que, a diferencia de otras especies de pinos Ibéricos, más pirófilas, *P. sylvestris* no regenera bien después de un incendio (PAUSAS *et al.*, 2004). Por lo tanto, en muchas ocasiones interesará una gestión forestal del pino silvestre focalizada en la reducción del riesgo de incendios. El cambio climático incrementa el riesgo de incendios (RI) para ambas especies. Así, un rodal sin gestionar de *P. sylvestris* presenta un RI de 0,49 %, que aumenta hasta 0,54 y 0,61 % en los escenarios moderado y extremo de cambio climático, respectivamente. Para *Q. ilex*, en las condiciones climáticas actuales, se alcanzan valores de RI del 0,38. Éstos se incrementan hasta el 0,4 en un escenario de cambio moderado y 0,52 % en un escenario de cambio extremo.

Al aplicar la gestión forestal, en todos los itinerarios considerados dichos índices se modifican enormemente excepto la fracción de la precipitación que se transpira (Figura 3), en cuyo caso las diferencias son marginales (reducción del 1-3% de la fracción de la precipitación transpirada en función del escenario climático y la gestión en la encina, y reducción del 4-10% en el pino), aunque se repite la tendencia que itinerarios de turno más corto, más intensos, consiguen reducir ligeramente la proporción de la precipitación que supone la transpiración. Teniendo en cuenta que un pinar de *P. sylvestris* sin gestionar transpira entre $294\text{-}312 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ dependiendo del escenario climático, una reducción del 7-10% que se da en la gestión de turno corto implicaría unos $200\text{-}300 \text{ m}^3$ de agua anuales adicionales para los sistemas aguas abajo de la parcela, que podrían resultar fundamentales para los ecosistemas fluviales, sobre todo teniendo en cuenta el incremento de aridez. Respecto a la producción primaria neta respecto a la transpiración (PAT, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), una medida de la eficiencia de la transformación del agua en estructuras propias, se observa que ésta incrementa hasta llegar a más que doblarse, mediante la gestión. Una gestión de turno más corto incrementa un 75-150 % la PAT, en la encina, y un 80-120% en el pino, en función del escenario climático que se considere. En el caso de un itinerario de turno más largo se observa un 50-100% de incremento en encina y 40-70% en pino. La PAT incrementa más en el itinerario de turno más corto en ambas especies y para los tres climas considerados. Un escenario de cambio más moderado obtiene valores inferiores de mejora respecto al clima actual. La limitación hídrica y el incremento de temperaturas provocan que, hasta

en un escenario de cambio climático extremo, la gestión de *P. sylvestris* evaluada mediante la PAT resulte menos eficiente que en las condiciones actuales. No obstante, en el caso de *Q. ilex*, el escenario de cambio climático extremo es, para ambos itinerarios de gestión, el que obtiene valores mayores de incremento de PAT.

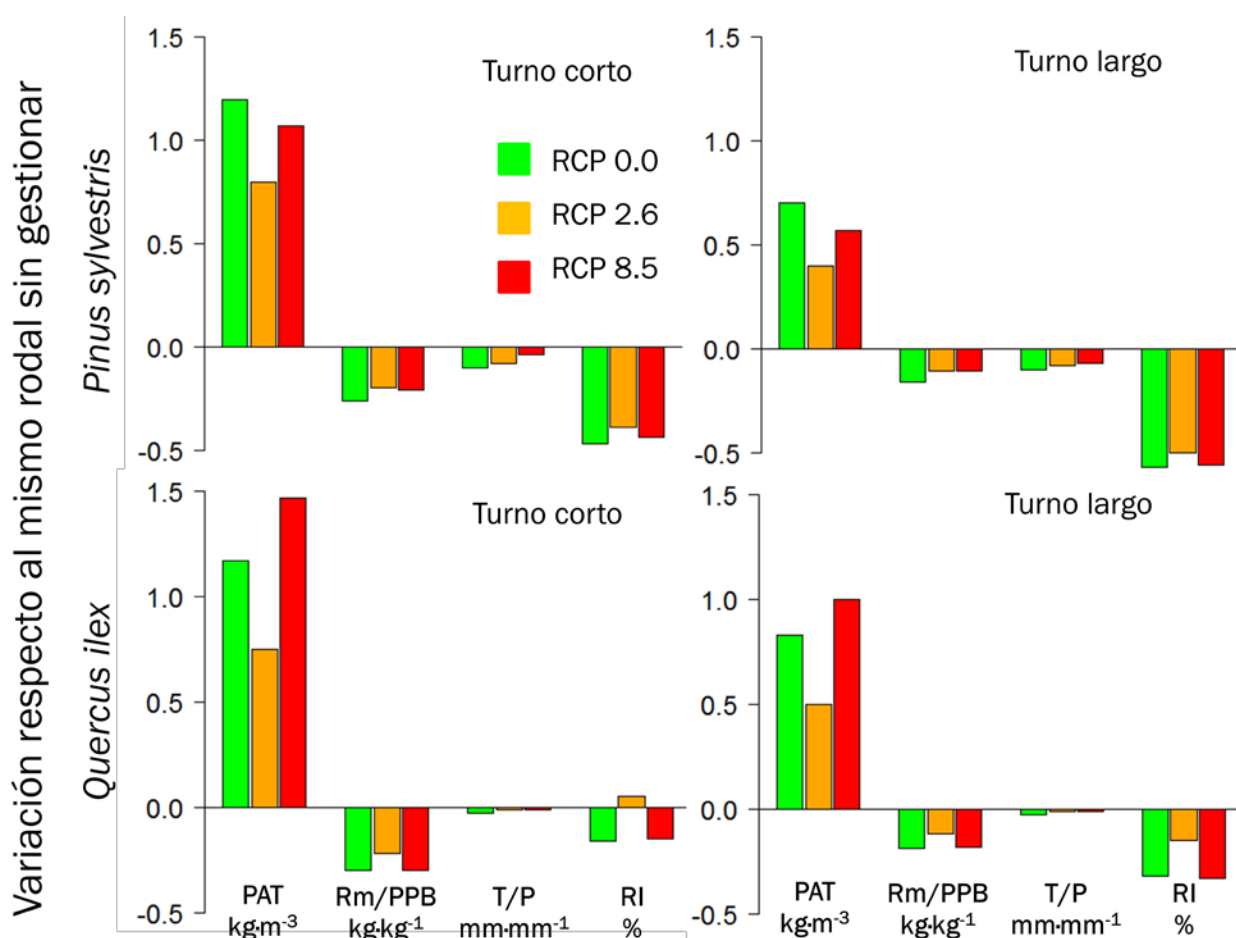


Figura 3. Incremento, en tanto por uno, de los distintos itinerarios de gestión respecto al bosque sin gestionar (incremento en tanto por uno respecto a los valores de la Tabla 4). Los paneles superiores indican la variación para los cuatro indicadores al aplicar la gestión de turno corto (izquierda) y largo (derecha), para *P. sylvestris*. Los paneles inferiores muestran la variación de los indicadores al aplicar la gestión de turno corto (izquierda) y largo (derecha) para *Q. ilex*. Para cada uno de los itinerarios de gestión, y cada uno de los índices, se indican los incrementos de los escenarios climáticos RCP 0.0 (verde), RCP 2.6 (naranja) y RCP 8.5 (rojo), respecto a sus respectivas parcelas sin gestionar. Los índices que se indican son la Producción Primaria Neta por volumen de Agua Transpirada (PAT, kg·m⁻³), la fracción de la producción primaria bruta que supone la respiración de mantenimiento (Rm/PPB, kg·kg⁻¹), la fracción de la precipitación que supone la transpiración (T/P, mm·mm⁻¹), y el porcentaje anual de pies muertos debido a incendio forestal (RI, %).

De la misma forma, todos los itinerarios de gestión considerados reducen la fracción de la producción primaria bruta que es dedicada a la respiración de mantenimiento (Rm/PPB, en kg·kg⁻¹). Es decir, en todos los escenarios climáticos y ambos itinerarios de gestión, ésta incrementa la cantidad de fotosintetizados disponibles una vez restada la respiración de mantenimiento del árbol, incrementando de esta forma tanto la producción de nuevas estructuras como la capacidad de rellenar las reservas de carbono móvil en caso de haber pasado por un período de estrés (López et al., 2009). En la encina se reduce entre el 22-30% la Rm/PPB para un itinerario de turno corto, y entre un 12-19% en un itinerario de turno largo. En este caso, ambos escenarios de cambio climático obtienen peores resultados que el clima actual. Este hecho es debido a un incremento de la respiración de mantenimiento, motivado por el incremento de temperaturas. En *P. sylvestris* se

mantiene esta tendencia, con valores de reducción del 20-26% en un itinerario de turno corto, y de 11-16% en uno de turno largo. Como se ha ido viendo a lo largo del artículo, *P. sylvestris* resulta mucho más penalizado en un escenario de cambio climático extremo que *Q. ilex*.

Por último, la reducción del riesgo de incendios (RI, en %), alcanza valores de una reducción del 50-56 % en el itinerario de turno largo, mientras que obtiene valores de 39-47% en el itinerario de turno corto, en función del escenario climático. Esto indica, a diferencia de los anteriores índices, que un itinerario de turno largo es más eficiente en la mitigación del RI, para todos los escenarios climáticos, que uno de turno corto, y que, mediante la gestión forestal, se puede reducir el RI de un pinar de *P. sylvestris* entre un 40-55%, dependiendo de la gestión y el escenario climático. En zonas con un elevado riesgo de incendios, como la zona estudiada, ésta reducción resulta muy significativa. En el encinar, la reducción del RI alcanza valores inferiores que en el pinar, con valores de 15-33% de reducción en función del escenario climático y para una gestión de turno largo, mientras que en una gestión de turno corto la gestión puede hasta incrementar el RI, en el caso de un escenario de cambio climático moderado, dando un rango de reducción del 5-16%, y siendo el único caso en el que la gestión forestal empeora los valores para una variable objetivo.

5. Conclusiones

Respondiendo a las hipótesis iniciales, se comprueba que en condiciones moderadas de cambio climático ambos rodales sufren severas restricciones en su crecimiento y su capacidad como sumidero de carbono. Por otro lado, la encina incrementa su crecimiento y su stock de carbono en condiciones de cambio climático extremo; el pino, por contra, y al final del período considerado, ve limitado su crecimiento y su capacidad como sumidero debido a las severas restricciones ambientales. Se observa también que la gestión forestal afecta poco la transpiración de ambas especies, reduciendo de forma ligeramente superior la transpiración de los pinares, aunque dicho efecto se reduce acorde al incremento de severidad del cambio climático.

Al mantener la masa forestal más rejuvenecida, y reducir la respiración de mantenimiento de los tejidos leñosos, se observa que efectivamente los itinerarios de turno más corto incrementan la extracción de madera y aumentan la eficiencia en el uso de agua para ambas especies. En condiciones de cambio climático los efectos de la gestión en este aspecto son más acusados en el encinar que en el pinar, ya que la encina, al no estar tan limitada por las condiciones ambientales más extremas, resulta claramente beneficiada del incremento de la concentración de CO₂ atmosférico.

Los itinerarios de gestión más largos también generan masas forestales más resistentes a los incendios, aunque es *P. sylvestris* la especie más favorecida por dichos itinerarios, con disminuciones de su RI que pueden llegar al 55% con la gestión de turno largo. No obstante, a mayor severidad del cambio climático, mayor resulta el riesgo de incendios para ambas especies.

Elegir el itinerario de gestión óptimo, por lo tanto, no únicamente consiste en elegir el mejor itinerario en función de los objetivos de gestión y las características ambientales actuales de la parcela, sino que debe considerarse también cual será la evolución del clima en la misma, porque dicho clima condicionará en gran medida los balances -y beneficios- obtenidos mediante gestión.

6. Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado parcialmente con apoyo económico del proyecto europeo Life DemORGEST (LIFE12_ENV_ES_000730). DN-S es beneficiario de una beca FP1 del Ministerio de Economía y Competitividad (BES-2015-072983) en el marco del proyecto MEDSOUL (CGL2014-59977-C3-1-R). Los autores agradecen a la persona anónima que ha revisado el artículo y nos ha ayudado a mejorarlo mediante sus consejos.

7. Bibliografía

- AGUADÉ, D.; POYATOS, R.; ROSAS, T.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 2015. Comparative Drought Responses of *Quercus ilex* L. and *Pinus sylvestris* L. in a Montane Forest Undergoing a Vegetation Shift. *Forests*, 6:2505-2529
- ALLEN, C.D.; DAVID, D.B.; MCDOWELL, N.G.; 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6:1-55
- BOND, W.J.; VAN WILGEN, B.W.; 1996. Why and how do ecosystems burn? *Fire and Plants*, Chapman & Hall, 1996, pp. 17-33.
- ERIKSSON, E.; GILLESPIE, A.R.; GUSTAVSSON, L.; et al.; 2007. Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, 37:671-681
- FONTES, L.; BONTEMPS, J.D.; BUGMANN, H.; et al.; 2010. Models for supporting forest management in a changing environment. *Forest Systems* 19:8-29
- GALIANO, L.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LLORET, F.; 2010. Drought-Induced Multifactor Decline of Scots Pine in the Pyrenees and Potential Vegetation Change by the Expansion of Co-occurring Oak Species. *Ecosystems*, 13:978-991
- GONZÁLEZ, J.R.; PALAHÍ, M.; TRASOBARES, A.; PUKKALA, T.; 2006. A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Annals of Forest Science*, 63:169-176
- GRACIA, C.A.; BURRIEL, J.; IBÁÑEZ, J.; MATA, T.; VAYREDA, J.; 2004. Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. CREA, Bellaterra.
- GRACIA, C.A.; SABATÉ, S.; MARTÍNEZ, J.M.; ALBEZA, E.; 1999. Functional responses to thinning. In *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Springer Berlin Heidelberg. pp 329-338
- GRACIA, C.A.; PLA, E.; SÁNCHEZ, A.; SABATÉ, S.; 2004. Gotilwa+: Un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de las Ciencias Forestales*. 18:21-28
- HYVÖNEN, R.; AGREN, G.; LINDER, S. et al.; 2006. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173:463-480
- IPCC; 2013. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- KEENAN, T.F.; HOLLINGER, D.Y.; BOHRER, G.; et al.; 2013. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature*, 499:324-327.
- LÓPEZ, B.C.; GRACIA, C.A.; SABATÉ, S.; KEENAN, T.; 2009. Assessing the resilience of Mediterranean holm oaks to disturbances using selective thinning. *Acta Oecologica*, 35:849-854
- MERLO, M.; BRIALES, E.R.; 2000. Public goods and externalities linked to Mediterranean forests: economic nature and policy. *Land Use Policy*, 17:197-208
- NADAL-SALA, D.; SABATÉ, S.; GRACIA, C.; 2014. GOTILWA+: un modelo de procesos que evalúa efectos del cambio climático en los bosques y explora alternativas de gestión para su mitigación.

Ecosistemas, 22:29-36

NADAL-SALA, D.; KEENAN, T.; SABATÉ, S.; GRACIA, C.; En prensa, a. Forest Eco-Physiological Models: Water Use and Carbon Sequestration. 31 pp.

NADAL-SALA, D.; SABATÉ, S.; GRACIA, C.; En prensa, b. Importancia relativa de la profundidad del suelo para la resiliencia de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) frente al incremento de aridez debido al cambio climático. Ecosistemas. 19 pp.

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2007a. Objective air temperature mapping for the Iberian Peninsula using spatial interpolation and GIS. *International Journal of Climatology*, 27:1231–1242

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2007b. Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and Applied Climatology*, 89:195–209

NORBY, R.J.; WARREN J.; IVERSEN, C.; et al.; 2010. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. *PNAS*, 107:19368-19373

PALAHÍ, M.; MAVSAR, R.; GRACIA, C.; et al.; 2008. Mediterranean forests under focus. *International forestry review*, 4:676-688

PAUSAS, J.; BLADÉ, C.; VALDECANTOS, A.; et al.; 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: New perspectives for and old practice - a review. *Plant Ecology*, 171:209-220

PIQUÉ, M.; BELTRÁN, M.; VERICAT, P.; et al.; 2011. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

VAUTARD, R.; GOBIET, A.; SOBOLOWSKI, S.; et al.; 2014. The European climate under a 2 C global warming. *Environmental Research Letters*, 9.3:034006

VAYREDA, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; GRACIA, M.; et al.; 2012. Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests. *Global Change Biology*, 18:1028-1041

VERICAT, P.; PIQUÉ, M.; BELTRÁN, M.; CERVERA, T.; 2011. Models de gestió per als boscos d'alzina (*Quercus ilex* subsp. *ilex*) i carrasca (*Quercus ilex* subsp. *bellota*), Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.