



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-164

---

---

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Efecto de las claras en el incremento radial intra-anual de masas mixtas de *Pinus pinaster* Ait. y *Quercus pyrenaica* Willd.

ALDEA, J.<sup>1,2</sup>, BRAVO, F.<sup>1,2</sup>, BRAVO-OVIEDO, A.<sup>3,1</sup>, RUIZ-PEINADO, R.<sup>3,1</sup>, RODRIGUEZ, F.<sup>4,5</sup> y RÍO, M.<sup>3,1</sup> del

<sup>1</sup> Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR). Universidad de Valladolid-INIA. Avda. Madrid s/n. 34004. Palencia. España.

<sup>2</sup> Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales, ETS de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia, España.

<sup>3</sup> Departamento de Selvicultura y Gestión de Sistemas Forestales, INIA, Ctra. A Coruña, km 7.5, 28040 Madrid, España.

<sup>4</sup> föra forest technologies. C/Eduardo Saavedra, 38, 42004, Soria, España.

<sup>5</sup> Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales, EU de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Soria, España

### Resumen

Los análisis de incremento radial permiten determinar la respuesta del arbolado a diferentes condiciones de competencia y clima. Este estudio evaluó la respuesta intra-anual a la clara en una masa mixta de *Pinus pinaster* Ait. y *Quercus pyrenaica* Willd. en dos localidades del centro de España. El incremento radial fue medido quincenalmente mediante dendrómetros de banda en un diseño experimental cuadrado latino, consistente en un control (sin aclarar) y dos tratamientos de clara sobre el pino: moderada (se cortó el 25% del área basimétrica inicial) y fuerte (40%). Las mediciones se realizaron durante tres años consecutivos climáticamente contrastados (2010-2012). Se empleó la suma de dos funciones logísticas para estimar los patrones intra-anales y se ajustó un modelo lineal mixto para analizar la influencia de variables meteorológicas en la tasa de incremento radial. La clara fuerte generó el mayor incremento radial acumulado, tanto en primavera como otoño para el pino, independientemente de la aridez del sitio. Las claras tuvieron también un resultado positivo para el rebollo aunque sus efectos no fueron tan evidentes. Finalmente, la tasa de incremento radial estuvo condicionada por la disponibilidad de luz (radiación solar) y agua (precipitación y déficit de presión de vapor) para ambas especies.

### Palabras clave

Dendrómetro de banda, competencia, gestión forestal, cambio climático.

### 1. Introducción

Numerosos estudios han puesto de manifiesto posibles ventajas de las masas mixtas sobre las monoespecíficas mediante el uso diferenciado y complementario de los recursos, ocasionado por la división de nichos de las especies (Condés y del Río, 2015; Knoke *et al.*, 2008; Pretzsch *et al.*, 2013). Ello puede conllevar un aumento de la resistencia y resiliencia frente a factores bióticos y abióticos como el estrés por sequía (Pretzsch *et al.*, 2013), lo que resultaría de vital importancia para las especies forestales de la cuenca mediterránea en un futuro inmediato de cambio climático. De este modo, las masas mixtas podrían tener un importante papel tanto ecológico como económico frente al previsible calentamiento global. Asimismo, las masas mixtas podrían incrementar la productividad, diversificar la producción y reducir el riesgo de daño por enfermedades o plagas (Condés *et al.*, 2013; Kelty, 2006; Pretzsch *et al.*, 2015; Pretzsch y Schütze, 2009). Por tanto, entender las dinámicas de crecimiento de las masas mixtas bajo diferentes condiciones climáticas y de niveles de competencia

puede ser una valiosa herramienta para establecer estrategias de adaptación de las masas forestales al cambio climático.

De acuerdo con ello, tratamientos de mejora como las claras han sido ampliamente recomendadas para tratar de mitigar los efectos del cambio climático sobre el crecimiento del arbolado, favoreciendo la disponibilidad y eficiencia en el uso del agua (D'Amato *et al.*, 2013; Magruder *et al.*, 2013). Condiciones de baja competencia previenen el estancamiento del crecimiento y hace menos vulnerables a las masas forestales frente a episodios de sequía (Fernández-de-Uña *et al.*, 2015; Martín-Benito *et al.*, 2010; Martínez-Vilalta *et al.*, 2012). De este modo, controlar la competencia por medio de las claras pueden ser una herramienta adecuada para la adaptación de las masas forestales a la sequía, lo que minimizaría los potenciales efectos adversos ecológicos y socio-económicos generados por el cambio climático (Sohn *et al.*, 2013, 2016a, 2016b). Por otra parte, los análisis de incremento radial pueden proveer una valiosa información sobre cómo los ecosistemas mediterráneos responderán a futuras condiciones de sequía (Martín *et al.*, 2014).

## 2. Objetivos

En el presente estudio se evalúan los patrones de incremento radial intra-anual de una masa mixta compuesta por pino (*Pinus pinaster* Ait.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) mediante el empleo de dendrómetros de banda, cuyas mediciones fueron realizadas cada quince días en dos localidades con diferente sequía. El objetivo principal del trabajo fue describir los efectos de las claras y de las condiciones climáticas sobre los patrones de incremento radial intra-anual para ambas especies.

## 3. Metodología

### 3.1. Diseño experimental

El estudio se localiza en dos sitios con diferentes condiciones de sequía: Lubia (Soria; 41° 39'N, 2°29'W) y San Pablo de los Montes (Toledo; 39°31'N, 4°16.6'W). El primero de ellos está ubicado en la cuenca del Duero a 1.134 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 512 mm, de los cuales 100 mm aprox. corresponden al periodo de sequía estival (AEMET, 2016). La temperatura media anual es de 10,0 °C con probabilidad de helada de septiembre a mayo. La segunda localización se encuentra situada a 1.102 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 469 mm, de los cuales 49 mm corresponden al periodo de sequía estival. La temperatura media anual es de 12,9 °C, siendo Julio el mes más caluroso con 23,9°C de media (AEMET, 2016). El estrato geológico de ambos lugares es similar, generando suelos arenosos ligeramente ácidos (pH 5-6).

Se empleó el software BIOrdry (Lara *et al.*, 2013) para calcular el índice de aridez anual de Walter-Lieth (WAI) para ambos lugares (Figura 1). Este índice se define como el cociente entre las áreas de la estación seca y húmeda basada en los climodiagramas de Walter-Lieth para los registros históricos de ambos lugares. De este modo, se evidenció la diferencia de sequía entre los sitios con un WAI de 0,22 para Lubia y 0,65 para San Pablo de los Montes (denominados ambos lugares de aquí en adelante como WAI-0.22 y WAI-0.65 respectivamente).

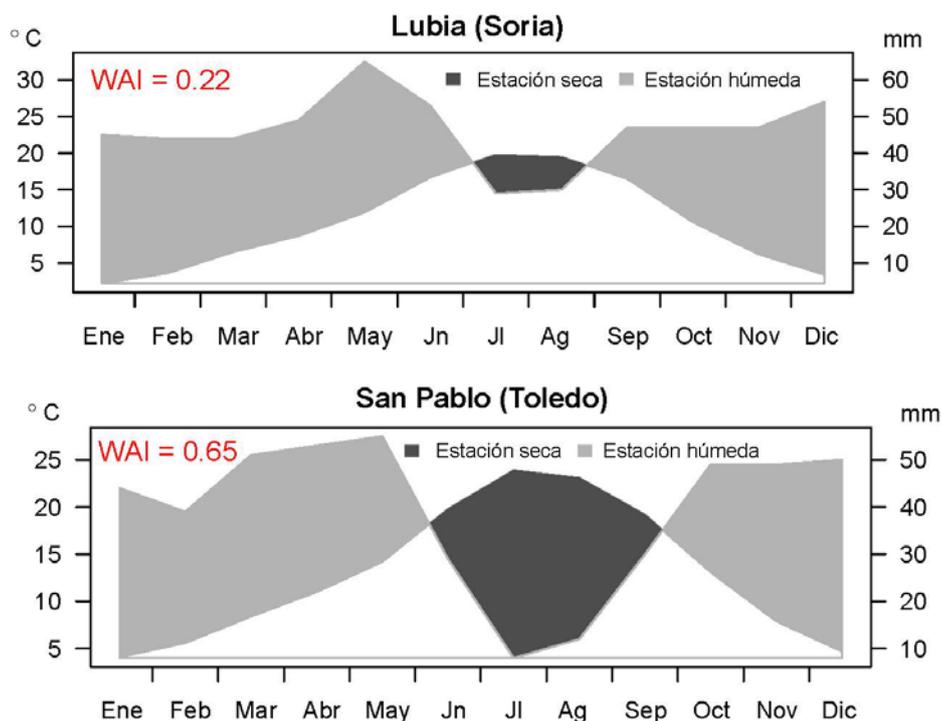


Figura 1. Índice de aridez de Walter-Lieth (WAI) para los dos lugares de muestreo basado en registros meteorológicos históricos (AEMET, 2016).

Se establecieron nueve parcelas rectangulares (tres repeticiones por tratamiento) de 600-800 m<sup>2</sup> en cada lugar de estudio sobre masas coetáneas de pino y monte bajo de rebollo, cuya disposición horizontal de los pies fue por fajas o líneas de repoblación, empleando un diseño experimental latino cuadrado. Dicho diseño consistió en un tratamiento control sin aclarar (tratamiento A) y dos intensidades de clara: moderada con la eliminación del 25% de área basimétrica inicial (tratamiento D) y fuerte con eliminación del 40% (tratamiento E). Se realizaron claras por lo bajo afectando exclusivamente a los pies de pino, de forma que se eliminaron los pies suprimidos y dominados (Tabla 1). No hubo diferencias estadísticas de las variables de masa inicial entre tratamientos antes de la clara para cada especie y sitio. Sin embargo, hubo diferencias entre sitios por especie: el tamaño (diámetro medio normal) y densidad fue mayor y menor respectivamente en WAI-0.65 en comparación con WAI-0.22.

Después de la clara se instalaron diez dendrómetros de banda (DB 20, EMS Brno) por especie y parcela a una altura de 1,30 m, haciendo un total de 360 los dispositivos colocados. Los árboles fueron seleccionados de acuerdo con la distribución diamétrica de la masa, de modo que representaran adecuadamente todo el rango de distribución de tamaños. Las mediciones se realizaron cada quince días a lo largo de tres años con diferentes condiciones climáticas (2010-2012). La escasa precipitación durante el otoño de 2011 y la primavera de 2012, generó un evento de extrema sequía en el año 2012. El control de las variables meteorológicas se realizó por medio de una estación meteorológica ubicada en cada sitio, en la que se registraron la precipitación, temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento. El déficit de presión de vapor (VPD) fue también calculado a partir de ellas. La falta de información puntual fue completada mediante datos oficiales procedentes de dos estaciones automáticas de la Agencia Estatal de Meteorología localizadas a 5 y 6 km de los ensayos experimentales.

1 Tabla 1. Principales características de la masa antes y después del tratamiento de clara para los dos sitios de estudio. Los datos mostrados son la media y desviación estándar.

2

<i>Quercus pyrenaica</i>							<i>Pinus pinaster</i>							
							Antes de clara				Después de clara			
Sitio	Trat	Ho (m)	Hm (m)	N (n/ha)	DBH (mm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	Hm (m)	N (n/ha)	DBH (mm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	Hm (m)	N (n/ha)	DBH (mm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)
WAI-0.22 (edad: 40)	A	11,0	4,8	2,203	45,4	5,1	9,4	1,388	182,8	38,9	9,4	1,388	182,8	38,9
		±0,7	±1,2	±399	±17,9	±1,4	±1,7	±225	±55,6	±5,2	±1,7	±225	±55,6	±5,2
	D	11,0	5,7	2,284	55,1	6,7	9,9	1,257	185,2	39,5	10,5	681	221,3	29,5
		±1,1	±1,8	±401	±22,9	±1,8	±1,7	±69	±58,7	±6,0	±1,2	±77	±39,9	±4,3
	E	11,3	5,1	2,406	46,5	6,7	9,8	1,228	187,7	39,3	10,6	482	225,5	23,4
		±1,0	±1,6	±484	±19,6	±2,8	±1,7	±235	±57,7	±4,9	±1,2	±112	±40,5	±2,9
WAI-0.65 (edad: 35)	A	10,9	5,8	2,013	65,5	6,7	10,8	591	258,8	32,2	10,8	591	258,8	32,2
		±1,5	±1,6	±458	±18,6	±1,7	±1,4	±46	±49,4	±2,8	±1,4	±46	±49,4	±2,8
	D	11,1	5,4	1,725	58,7	5,5	10,4	574	252,1	30,2	10,6	394	272,6	23,5
		±0,8	±1,5	±366	±17,6	±0,4	±1,2	±98	±54,0	±1,6	±1,2	±63	±46,0	±1,1
	E	11,1	5,3	1,633	60,6	5,5	10,8	606	263,8	34,2	11,0	301	289,2	20,1
		±1,2	±1,5	±313	±17,4	±2,1	±1,2	±45	±51,3	±3,1	±1,1	±21	±37,9	±0,7

Trat: intensidad de clara; Ho: altura dominante; Hm: altura media; N: número de pies/ha; DBH: diámetro medio normal; AB: área basimétrica.

## 3.2. Análisis estadístico

### 3.2.1. Efecto de la clara en el patrón de incremento radial acumulado

El análisis descriptivo inicial, a partir de un análisis de dispersión de puntos (Figura 2), puso de manifiesto un comportamiento bimodal en el patrón de incremento radial acumulado para ambas especies, como consecuencia de la marcada sequía estival propia de ambientes mediterráneos y similar al de otras especies con esta distribución ecológica (Albuixech *et al.*, 2012; Camarero *et al.*, 2010).

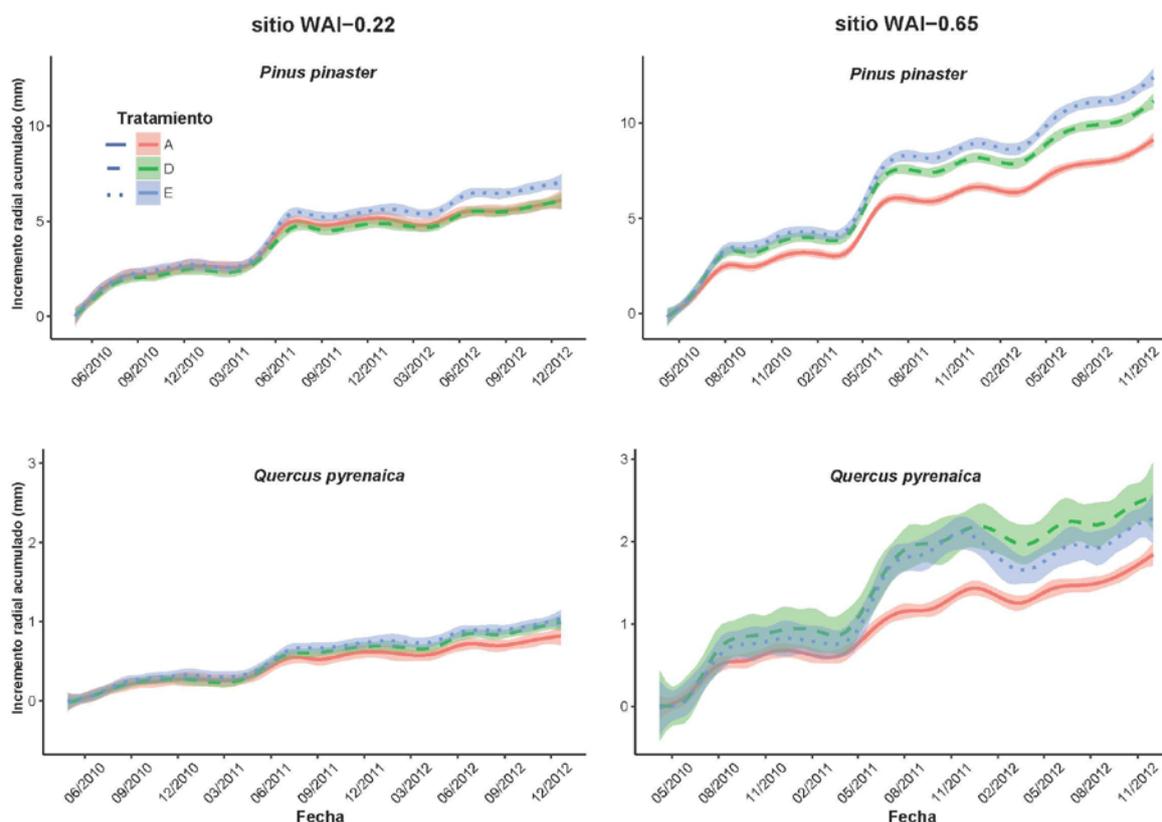


Figura 2. Incremento medio radial acumulado por especie, tratamiento y sitio durante los tres años de estudio (2010-2012). Los intervalos de confianza (área sombreada) muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Atendiendo a ello, la función matemática ajustada al comportamiento medio del incremento radial acumulado fue el resultado de la sumatoria de dos funciones logísticas (ecuación 1). La primera parte de la ecuación representa la función sigmoide generada debido al incremento radial acumulado durante el periodo de primavera, mientras que la segunda parte corresponde al de otoño. Además, debido a la dependencia espacio-temporal de las mediciones, el modelo fue ampliado con una estructura de efectos aleatorios, afectando solamente al parámetro  $\beta_1$  para evitar la sobreparametrización o sobreajuste. Esta decisión se llevó a cabo atendiendo al menor valor del índice de Akaike (AIC) en relación con el resto de parámetros. Asimismo, se evaluaron diferentes estructuras de la matriz de varianzas-covarianzas para los efectos aleatorios, y se emplearon las gráficas de residuos y de la función de autocorrelación como herramientas de diagnóstico de la heterocedasticidad y la autocorrelación residual. Finalmente, se empleó una función de potencia y constante para modelar la heterocedasticidad de la varianza cuando fue necesario (Pinheiro and Bates, 2000). La forma definitiva de la función matemática ajustada para el incremento medio radial acumulado para cada tratamiento, especie y sitio fue la siguiente:

$$cri_{ijk}(t) = \left\{ (\beta_1 + \omega_k + u_{jk} + v_{ijk}) + \frac{\beta_2 - (\beta_1 + \omega_k + u_{jk} + v_{ijk})}{(1 + e^{(t-\beta_3)/\beta_4})} \right\} + \left\{ (\beta_5 - (\beta_1 + \omega_k + u_{jk} + v_{ijk})) + \frac{(\beta_1 + \omega_k + u_{jk} + v_{ijk}) - \beta_5}{(1 + e^{(t-\beta_6)/\beta_7})} \right\} + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

30 donde  $cri_{ijk}$  es el incremento radial acumulado para el árbol  $i$  en la parcela  $j$  y año  $k$  (mm);  $\beta_i$  son  
 31 los coeficientes de regresión del modelo, los cuales representan:  $\beta_1$  la asíntota de primavera del  
 32 incremento radial,  $\beta_2$  la asíntota inicial (nula),  $\beta_3$  el número de días juliano que transcurren hasta  
 33 alcanzar el punto de inflexión,  $\beta_4$  es el parámetro de escala de primavera, que representa las tres  
 34 cuartas partes de la distancia de  $\beta_1$  (cuanto menor sea, mayor es el incremento radial),  $\beta_5$  es la  
 35 asíntota de otoño o incremento radial alcanzado a final de año,  $\beta_6$  son los días que transcurren hasta  
 36 el punto de inflexión otoñal y  $\beta_7$  es el parámetro de escala de otoño que representa las tres cuartas  
 37 partes de la distancia comprendida entre  $\beta_5$  y  $\beta_1$  (cuanto menor sea, mayor es el incremento radial);  $t$   
 38 es el tiempo transcurrido desde el 1 de enero;  $\omega_k \sim N(0, \sigma_k)$  es el efecto aleatorio del año;  $u_{jk} \sim N(0,$   
 39  $\sigma_{jk})$  es el efecto aleatorio de la parcela;  $v_{ijk} \sim N(0, \sigma_{ijk})$  es el efecto aleatorio del árbol y  $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_e)$   
 40 es el término del error.

### 41 3.2.2. Efecto del clima y la clara en el ratio de incremento radial

42  
 43 Se ajustó un modelo lineal mixto para cada especie y sitio con el fin de describir el efecto  
 44 existente de las variables meteorológicas y del tratamiento de clara sobre el ratio de incremento  
 45 radial o incremento corriente. Las variables meteorológicas se calcularon para diferentes lapsos de  
 46 tiempo anteriores a las mediciones: valores acumulados o medios de las variables meteorológicas  
 47 con un lapso de tiempo de cinco, diez, quince y veinte días anteriores a cada medición radial. La  
 48 multicolinealidad se controló por medio del factor de inflación de la varianza, la autocorrelación  
 49 residual mediante la gráfica de la función de autocorrelación y el índice de Akaike (AIC) se empleó  
 50 para la búsqueda del modelo más parsimonioso. La estructura final del modelo lineal mixto fue de la  
 51 siguiente forma:

$$52 \quad rir_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 TrtD + \beta_2 TrtE + \beta_3 dbh_{ij} + f(\text{clima}) + \omega_k + u_{jk} + v_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2]$$

53 donde  $rir_{ijk}$  es el ratio de incremento radial para el árbol  $i$  en la parcela  $j$  y año  $k$  (mm);  $\beta_i$  son los  
 54 coeficientes de regresión del modelo;  $TrtD$  y  $TrtE$  son variables dummy del tratamiento de clara;  $dbh_{ij}$   
 55 es el diámetro medio normal (mm);  $f(\text{clima})$  es una función lineal de variables meteorológicas;  $\omega_k \sim N$   
 56  $(0, \sigma_k)$  es el efecto aleatorio debido al año;  $u_{jk} \sim N(0, \sigma_{jk})$  es el efecto aleatorio de la parcela;  $v_{ijk} \sim N$   
 57  $(0, \sigma_{ijk})$  es el efecto aleatorio del árbol y  $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_e)$  es el término del error. Finalmente, se realizó  
 58 un análisis *post-hoc* basado en la comparación múltiple de medias usando un contraste de Tukey  
 59 para identificar las posibles diferencias entre intensidades de clara cuando fue necesario.

## 60 4. Resultados

61

### 62 4.1. Efecto de la clara en el patrón de incremento radial acumulado

63

64 Los resultados obtenidos a partir del ajuste de las funciones bilogísticas (ec.1) para la  
 65 descripción del patrón medio del incremento radial acumulado por especie y sitio, pueden observarse  
 66 en la Figura 3.

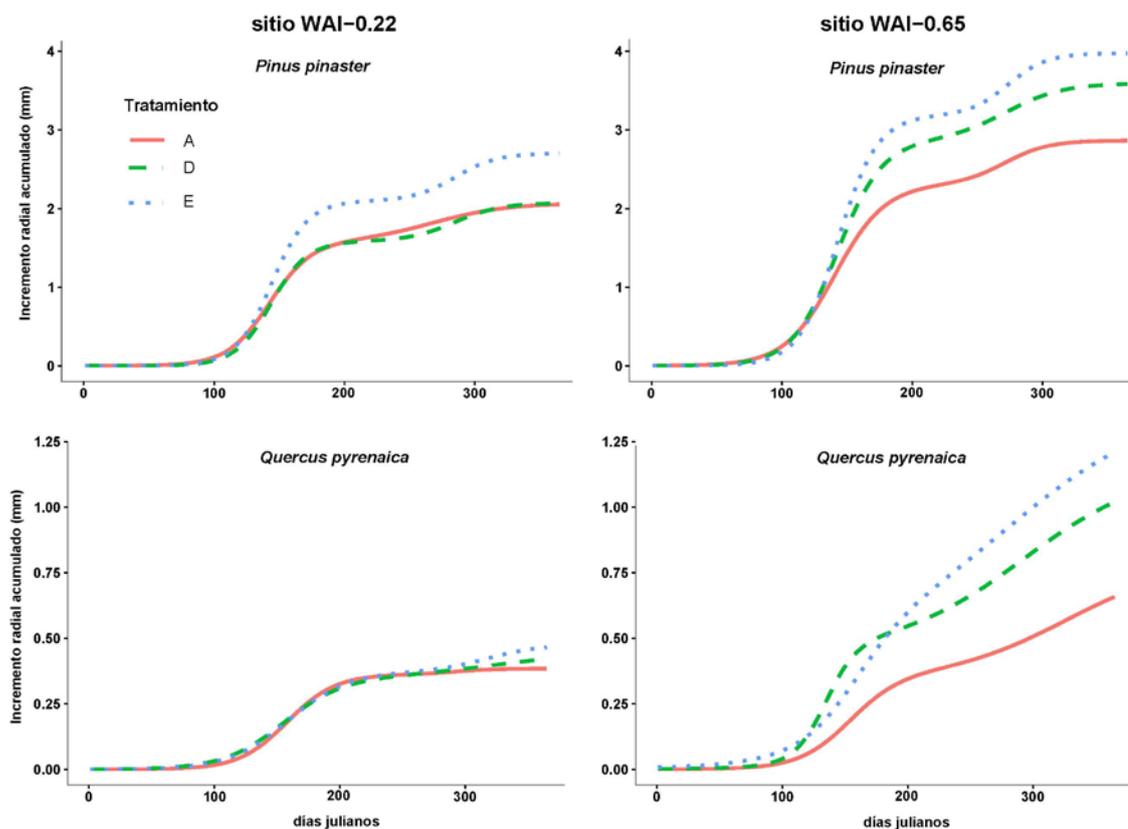


Figura 3. Patrón intra-anual del incremento radial acumulado medio (2010-2012) por especie, tratamiento y sitio obtenido a partir del ajuste estadístico de la ecuación 1.

67

68

69

Además, la Tabla 2 muestra las diferencias estadísticamente significativas para los parámetros procedentes de los modelos ajustados entre tratamientos y especies de cada sitio. Los incrementos radiales acumulados de primavera y otoño ( $\beta_1$  y  $\beta_5$ ) fueron mayores en la ubicación WAI-0.65 que en WAI-0.22 para ambas especies (p-valor menor de 0,05 en todos los casos, excepto para el tratamiento control de rebollo  $\beta_1$ , con un p-valor de 0,911; resultados no mostrados). Además, por lo general, el incremento acumulado en primavera ( $\beta_1$ ), supero al generado en el periodo de otoño ( $\beta_5 - \beta_1$ ), independientemente del sitio y la especie. Con respecto a las diferencias entre especies, se apreciaron mayores valores en el incremento radial acumulado en primavera y otoño (asíntotas  $\beta_1$  y  $\beta_5$ ) y un menor valor de parámetro de escala ( $\beta_4$  y  $\beta_7$ ) para el pino, lo que confirma un incremento radial más pronunciado que para el rebollo. Por el contrario, los puntos de inflexión de primavera y otoño ( $\beta_3$  y  $\beta_6$ ) fueron generalmente menores en el caso del pino.

81

Las claras fuertes aumentaron el incremento radial acumulado en primavera y otoño ( $\beta_1$  y  $\beta_5$ ), y prolongaron el periodo de incremento ( $\beta_3$  y  $\beta_6$  en el sitio WAI-0.22, y  $\beta_3$  en el WAI-0.65) para el pino, aunque dicho periodo de tiempo fue menor que la frecuencia de muestreo (cada dos semanas). Además, el parámetro de escala ( $\beta_4$  y  $\beta_7$ ) fue menor para el tratamiento de clara fuerte, reflejando de nuevo un mayor ratio de incremento radial. Las claras moderadas tuvieron también un efecto positivo mejorando el incremento radial ( $\beta_1$ ,  $\beta_4$  y  $\beta_5$ ) para el pino de WAI-0.65, pero sin ningún efecto sobre las asíntotas de primavera y otoño ( $\beta_1$  y  $\beta_5$ ) en WAI-0.22. Las claras fuertes también aumentaron el incremento radial de primavera ( $\beta_1$ ) y prolongaron el periodo de incremento ( $\beta_3$ ) para los rebollos del sitio WAI-0.65. El incremento radial acumulado en otoño ( $\beta_5$ ) para el rebollo fue mayor para los tratamientos de clara independientemente del sitio, aumentando con la intensidad de la clara pero sin diferencias estadísticamente significativas entre ellas.

92

93 *Tabla 2. Diferencias de los parámetros de los modelos ajustados (ec.1) entre tratamientos y especies de cada sitio. La*  
 94 *diferencia en letras denota diferencias estadísticamente significativas a un nivel de significación de 0,05.*

Parametro	Especies	WAI-0.22			WAI-0.65		
		Trat.A	Trat.D	Trat.E	Trat.A	Trat.D	Trat.E
$b_1$	<i>P.pinaster</i>	1,58 <i>b</i>	1,58 <i>b</i>	2,09 <i>c</i>	2,30 <i>c</i>	2,86 <i>d</i>	3,18 <i>d</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	0,36 <i>a</i>	0,35 <i>a</i>	0,37 <i>a</i>	0,35 <i>a</i>	0,45 <i>ab</i>	0,47 <i>b</i>
$b_2$	<i>P.pinaster</i>	- 0,032 <i>ab</i>	-0,052 <i>a</i>	-0,025 <i>b</i>	0,063 <i>d</i>	0,060 <i>d</i>	0,045 <i>d</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	-0,0010 <i>d</i>	-0,012 <i>bc</i>	-0,010 <i>c</i>	-0,068 <i>b</i>	-0,035 <i>c</i>	-0,13 <i>a</i>
$b_3$	<i>P.pinaster</i>	142,33 <i>a</i>	143,61 <i>ab</i>	144,15 <i>b</i>	140,52 <i>b</i>	142,17 <i>bc</i>	142,92 <i>c</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	158,05 <i>cd</i>	154,98 <i>c</i>	158,66 <i>d</i>	153,80 <i>d</i>	134,59 <i>a</i>	157,65 <i>e</i>
$b_4$	<i>P.pinaster</i>	16,27 <i>b</i>	13,97 <i>a</i>	13,84 <i>a</i>	19,20 <i>d</i>	17,34 <i>c</i>	15,08 <i>b</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	19,22 <i>c</i>	23,76 <i>d</i>	23,59 <i>d</i>	20,07 <i>de</i>	12,40 <i>a</i>	21,83 <i>e</i>
$b_5$	<i>P.pinaster</i>	2,07 <i>c</i>	2,07 <i>c</i>	2,70 <i>d</i>	2,86 <i>c</i>	3,59 <i>d</i>	3,97 <i>e</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	0,38 <i>a</i>	0,44 <i>b</i>	0,47 <i>b</i>	0,78 <i>a</i>	1,15 <i>b</i>	1,39 <i>b</i>
$b_6$	<i>P.pinaster</i>	269,33 <i>a</i>	284,96 <i>bc</i>	285,01 <i>b</i>	271,50 <i>a</i>	272,27 <i>a</i>	273,70 <i>a</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	293,70 <i>c</i>	325,00 <i>d</i>	317,60 <i>d</i>	326,00 <i>b</i>	292,69 <i>ab</i>	283,09 <i>a</i>
$b_7$	<i>P.pinaster</i>	27,92 <i>b</i>	17,52 <i>a</i>	15,94 <i>a</i>	16,90 <i>ab</i>	21,64 <i>b</i>	14,75 <i>a</i>
	<i>Q.pyrenaica</i>	15,49 <i>a</i>	40,63 <i>c</i>	21,09 <i>a</i>	44,12 <i>c</i>	49,63 <i>c</i>	59,09 <i>c</i>

#### 95 4.2. Efecto del clima y la clara en el ratio de incremento radial

96 Los resultados procedentes de los modelos ajustados para el ratio de incremento radial (ec.2)  
 97 están recogidos en la Tabla 3. La gráfica de la función de autocorrelación mostró que no fue  
 98 necesario corregir la correlación de los residuos. Las variables meteorológicas incluidas en los  
 99 modelos fueron todas ellas, las observadas durante los cinco días previos a la medición, de acuerdo  
 100 con el análisis del menor índice de Akaike (AIC). Las variables estadísticamente significativas que  
 101 finalmente formaron parte del modelo fueron: la precipitación total acumulada (P; mm), radiación  
 102 solar (SR; 10KJ/m<sup>2</sup>) y el déficit medio de presión de vapor (VPD; kPa). Dos variables adicionales  
 103 fueron incorporadas para los rebollos: temperatura mínima del aire (Tmin, °C) y humedad relativa  
 104 mínima (RHmin; %).  
 105  
 106

107 Todas las variables meteorológicas estuvieron positivamente correlacionadas con el ratio de  
 108 incremento radial, excepto el déficit de presión de vapor, que fue especialmente acusado en verano.  
 109 La radiación solar y precipitación hicieron que el aumento del incremento radial fuera mayor en  
 110 primavera que en otoño. La variable temperatura mínima del aire penalizó temperaturas muy bajas,  
 111 mientras que un aumento en la humedad relativa mínima del aire mejoró la tasa de incremento radial  
 112 para el rebollo.  
 113

114 El efecto positivo del tratamiento de clara fuerte fue estadísticamente significativo para el pino  
 115 en ambos lugares. Sin embargo no hubo diferencias entre la clara moderada y el control en el sitio  
 116 WAI-0.22. Los resultados para el rebollo de nuevo pusieron de manifiesto el efecto positivo del  
 117 tratamiento de clara en WAI-0.65 aunque sin diferencias entre intensidades de corta (p-valor de  
 118 0.917 de acuerdo con el test de Tukey). Sin embargo, únicamente las claras moderadas tuvieron un  
 119 efecto positivo en para el rebollo del sitio WAI-0.22.  
 120  
 121

122  
123

Tabla 3. Modelos ajustados para el ratio de incremento radial por especies y sitios. Los parámetros significativos están en negrita (nivel de significación de 0,05).

Parametro	WAI-0.22				WAI-0.65			
	<i>P. pinaster</i>		<i>Q. pyrenaica</i>		<i>P. pinaster</i>		<i>Q. pyrenaica</i>	
	Coef.	p-valor	Coef.	p-valor	Coef.	p-valor	Coef.	p-valor
$b_0$ (TrtA)	<b>-1.52·10<sup>-2</sup></b>	< 0.001	<b>-8.00·10<sup>-3</sup></b>	< 0.001	<b>-5.71·10<sup>-3</sup></b>	0.003	<b>-1.06·10<sup>-2</sup></b>	< 0.001
$b_1$ (TrtD)	-1.78·10 <sup>-4</sup>	0.649	<b>1.07·10<sup>-3</sup></b>	<b>0.001</b>	<b>2.52·10<sup>-3</sup></b>	0.002	<b>1.26·10<sup>-3</sup></b>	<b>0.004</b>
$b_2$ (TrtE)	<b>8.15·10<sup>-4</sup></b>	<b>0.046</b>	-1.84·10 <sup>-4</sup>	0.518	<b>3.49·10<sup>-3</sup></b>	< 0.001	<b>1.11·10<sup>-3</sup></b>	<b>0.013</b>
$b_3$ (dbh <sub>ij</sub> )	<b>3.17·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	<b>3.52·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	<b>1.78·10<sup>-5</sup></b>	0.006	<b>5.37·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001
$b_4$ (P)	<b>3.49·10<sup>-4</sup></b>	< 0.001	<b>6.11·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	<b>2.55·10<sup>-4</sup></b>	< 0.001	<b>7.02·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001
$b_5$ (SR)	<b>4.39·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	<b>6.24·10<sup>-6</sup></b>	< 0.001	<b>5.47·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	<b>6.17·10<sup>-6</sup></b>	< 0.001
$b_6$ (VPD)	<b>-1.83·10<sup>-2</sup></b>	< 0.001	<b>-2.24·10<sup>-3</sup></b>	< 0.001	<b>-2.14·10<sup>-2</sup></b>	< 0.001	<b>-3.18·10<sup>-3</sup></b>	< 0.001
$b_7$ (T <sub>min</sub> )	n.s.		<b>2.77·10<sup>-4</sup></b>	< 0.001	n.s.		<b>4.25·10<sup>-4</sup></b>	< 0.001
$b_8$ (RH <sub>min</sub> )	n.s.		<b>5.13·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001	n.s.		<b>5.79·10<sup>-5</sup></b>	< 0.001
$\sigma_k$ (año)	1.44·10 <sup>-3</sup>		1.73·10 <sup>-7</sup>		8.80·10 <sup>-4</sup>		1.71·10 <sup>-4</sup>	
$\sigma_{jk}$ (parcela)	2.83·10 <sup>-4</sup>		3.97·10 <sup>-8</sup>		1.07·10 <sup>-3</sup>		4.91·10 <sup>-4</sup>	
$\sigma_{ijk}$ (árbol)	3.02·10 <sup>-7</sup>		1.46·10 <sup>-3</sup>		2.03·10 <sup>-7</sup>		1.52·10 <sup>-3</sup>	
$\sigma_e$ (error)	1.06·10 <sup>-2</sup>		4.49·10 <sup>-3</sup>		1.52·10 <sup>-2</sup>		5.09·10 <sup>-3</sup>	

124

125 **5. Discusión**

126

127

127 **5.1. Respuesta a la clara en el patrón de incremento radial acumulado**

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

Los resultados procedentes del ajuste de los modelos mostraron un efecto positivo de la clara sobre el patrón de incremento radial acumulado para ambas especies, afectando tanto a la cantidad como a la duración del incremento (Figura 3 y Tabla 2). No obstante, la prolongación del incremento debido a las claras fuertes fue siempre menor que la frecuencia de muestreo (cada dos semanas), de modo que no se pudo comprobar realmente a partir de los datos observados. La clara fuerte generó el mayor incremento radial acumulado, tanto de primavera como de otoño para el pino, independientemente del sitio de estudio. Dichos resultados son consistentes con otros estudios de claras llevados a cabo para otras especies. Linares *et al.* (2009) y van der Maaten (2013), por ejemplo, concluyeron que las claras son una herramienta fundamental para reducir la transpiración e interceptación de la masa, incrementando la disponibilidad de agua y acelerando el incremento radial de primavera. Además, las claras aumentaron el incremento radial para el rebollo en ambos sitios, lo que pone de manifiesto que la disponibilidad de agua para esta especie es más importante que la temperatura sobre el crecimiento primaveral. Este mismo resultado ha sido demostrado para otras especies propias del área mediterránea (Linares y Camarero, 2012).

Se encontraron similares diferencias entre tratamientos durante el incremento radial acumulado en primavera y en otoño ( $\beta_1$  y  $\beta_5$ ), sugiriendo que la contracción diamétrica generada durante la sequía estival es recuperada en otoño por medio de un proceso de rehidratación celular. En este sentido, estudios de xilogenesis para *P. pinaster* en la Península Ibérica, demuestran que el

148 aumento de diámetro en otoño está vinculado a una mera expansión celular debido al agua, en  
149 comparación con la división celular del cambium (Vieira *et al.*, 2014). De forma análoga, la sequía  
150 estival induce una caída prematura de las hojas del rebollo como mecanismo para evitar la cavitación  
151 de los vasos de primavera, generando consigo una disminución en la producción de madera tardía  
152 (Peguero-Pina *et al.*, 2015). Además, la senescencia propia de las masas del monte bajo de rebollo,  
153 podría contrarrestar los efectos de la clara, impidiendo la generación de madera de otoño (Corcuera *et*  
154 *al.*, 2006). De este modo, ambos factores podrían contribuir a fomentar el estancamiento de la masa  
155 de rebollo, lo que podría dar respuesta (junto con la elevada competencia entre resalvos) al bajo  
156 incremento radial en comparación con el pino.

157  
158 Estudios previos de masas mixtas de pino y rebollo en la Península Ibérica demuestran la  
159 complementariedad entre especies (Río y Sterba, 2009), lo que se traduce en una mayor importancia  
160 de la competición intra-específica que inter-específica, debido probablemente a las diferentes  
161 estrategias de aprovechamiento de los recursos por encima y por debajo del suelo. Las diferencias en  
162 los patrones de incremento observados en este estudio sugieren una complementariedad temporal  
163 entre las dos especies. Asimismo, la diferencia social de las especies (Tabla 1) podría explicar las  
164 desigualdades observadas entre ellas en el incremento radial acumulado en respuesta a la clara. La  
165 eliminación de pies de pino mediante la clara disminuyó la competencia intra-específica para el pino,  
166 lo que propició una mayor respuesta en incremento radial en comparación con el rebollo. No  
167 obstante, a pesar de encontrarse en peores condiciones de sequía (Figura 1) el incremento radial  
168 acumulado fue mayor en WAI-0.65 independientemente de la especie, debido probablemente a un  
169 mayor tamaño del arbolado como consecuencia de una menor competencia (Tabla1), evidenciando  
170 nuevamente la importancia del espaciamiento del arbolado.

## 171 172 **5.2. Respuesta al clima y clara en el ratio de incremento radial**

173  
174 La tasa de incremento radial varió en función del grado de competencia del arbolado (factor  
175 clara) y de las condiciones meteorológicas. Dichas condiciones reflejan la influencia de la luz (SR) y la  
176 disponibilidad de agua (P y VPD) sobre el incremento radial. La radiación solar promueve la  
177 fotosíntesis y la fijación de carbono (Zweifel *et al.*, 2005), mientras que la precipitación afecta a la  
178 disponibilidad de agua del suelo, siendo el factor limitante para el crecimiento en la cuenca  
179 mediterránea. El déficit de presión de vapor (VPD) refleja la dependencia de la respuesta fisiológica  
180 del arbolado a las condiciones atmosféricas. De este modo, el estrés hídrico generado en periodo  
181 estival está asociado a altos valores de VPD y baja precipitación, produciendo un marcado patrón  
182 bimodal en las especies estudiadas. La tasa de incremento radial para el rebollo está además  
183 influenciada por la humedad y temperatura del aire, debido probablemente a una mayor dependencia  
184 del contenido de humedad del aire en frondosas que en coníferas (Zweifel *et al.*, 2005).

185  
186 Por otra parte, se corrobora nuevamente la importancia de la clara fuerte para el pino en ambos  
187 lugares. También se vuelve a confirmar el efecto positivo de la clara sobre el rebollo, si bien, la  
188 ausencia de diferencias entre intensidades de clara podría deberse a un enmascaramiento de los  
189 resultados debidos al factor clon, o bien, a que la clara no tiene como objetivo la eliminación de pies  
190 de rebollo. Aunque se ha evidenciado en algunos casos un efecto positivo de las claras o resalvo de  
191 rebollo (Cañellas *et al.*, 2004), ésta podría no asegurar el éxito pretendido sobre el crecimiento de  
192 esta especie (Amorini *et al.*, 1996), pudiendo agravar el problema debido a un rebrote descontrolado  
193 de raíz.

## 194 195 **6. Conclusiones**

196  
197 Los resultados obtenidos en el presente estudio pueden proporcionar una satisfactoria  
198 herramienta a la complicada gestión de las masas mixtas de pino y monte bajo de rebollo. Reducir la  
199 competencia mediante una clara fuerte sobre el pino estimula y genera un aumento en el incremento

200 radial de ambas especies. En la actualidad, resulta imprescindible conocer los efectos de la gestión  
 201 forestal, como las claras del presente estudio, para tratar de conseguir una óptima adaptación de las  
 202 masas forestales frente al inminente cambio climático.

203

## 204 7. Agradecimientos

205

206 Este trabajo estuvo financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad español, a través  
 207 de los proyectos de investigación AGL2011-29701-C02-01, AGL2011-29701-C02-02, AGL2014-  
 208 51964-C2-1-R y AGL2014-51964-C2-2-R. Los autores reconocen a todas las personas que  
 209 participaron en el establecimiento y desarrollo de los ensayos de claras y mediciones de los  
 210 dendrómetros, especialmente a Raquel Onrubia, Alvaro Rubio y Javier Rodríguez, así como a los  
 211 servicios forestales de las provincias de Toledo y Soria, donde se establecieron los ensayos. Un  
 212 agradecimiento especial a José Riofrío, Nicolás Cattaneo y Wilson Lara por la sugerencia en el  
 213 modelado y preparación del manuscrito. Además, los autores agradecen a la Agencia Española  
 214 Estatal de Meteorología (AEMET) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente por la  
 215 concesión del acceso a datos meteorológicos oficiales.

216

## 217 8. Bibliografía

218

- 219 ALBUIXECH; J.; CAMARERO; J.J.; MONTSERRAT-MARTI; G.; 2012. Dinamica estacional del crecimiento  
 220 secundario y anatomía del xilema en dos *Quercus mediterraneos* que coexisten. *For. Syst.*  
 221 doi:10.5424/fs/2112211-12076
- 222 AMORINI; E.; BRUSCHINI; S.; CUTINI; A.; FABBIO; G.; MANETTI; M.; 1996. Silvicultural treatment of  
 223 holm oak (*Quercus ilex* L.) coppices in Southern Sardinia: thinning and related effects on stand  
 224 structure and canopy cover. *Ann. Ist. Sper. Selvic.* 27; 167–176.
- 225 CAMARERO; J.J.; OLANO; J.M.; PARRAS; A.; 2010. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from  
 226 continental Mediterranean climates. *New Phytol.* doi:10.1111/j.1469-8137.2009.03073.x
- 227 CAÑELLAS, I., RÍO, M., DEL, ROIG, S., MONTERO, G., 2004. Growth response to thinning in *Quercus*  
 228 *pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. *Ann.For. Sci.* 61, 243–250,  
 229 <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2004017>.
- 230 CONDÉS; S.; DEL RÍO; M.; 2015. Climate modifies tree interactions in terms of basal area growth and  
 231 mortality in monospecific and mixed *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests. *Eur. J. For. Res.*  
 232 doi:10.1007/s10342-015-0912-0
- 233 CONDÉS; S.; DEL RIO; M.; STERBA; H.; 2013. Mixing effect on volume growth of *Fagus sylvatica* and  
 234 *Pinus sylvestris* is modulated by stand density. *For. Ecol. Manage.*  
 235 doi:10.1016/j.foreco.2012.12.013
- 236 CORCUERA; L.; CAMARERO; J.J.; SISÓ; S.; GIL-PELEGRÍN; E.; 2006. Radial-growth and wood-anatomical  
 237 changes in overaged *Quercus pyrenaica* coppice stands: Functional responses in a new  
 238 Mediterranean landscape. *Trees - Struct. Funct.* doi:10.1007/s00468-005-0016-4
- 239 D'AMATO; A.W.; BRADFORD; J.B.; FRAVER; S.; PALIK; B.J.; 2013. Effects of thinning on drought  
 240 vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecol. Appl.* 23; 1735–  
 241 1742. doi:10.1890/13-0677.1
- 242 FERNÁNDEZ-DE-UÑA; L.; CAÑELLAS; I.; GEA-IZQUIERDO; G.; 2015. Stand Competition Determines How  
 243 Different Tree Species Will Cope with a Warming Climate. *PLoS One* 10; e0122255.  
 244 doi:10.1371/journal.pone.0122255
- 245 KELTY; M.J.; 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. *For. Ecol. Manage.*  
 246 doi:10.1016/j.foreco.2006.05.011
- 247 KNOKE; T.; AMMER; C.; STIMM; B.; MOSANDL; R.; 2008. Admixing broadleaved to coniferous tree  
 248 species: a review on yield; ecological stability and economics. *Eur. J. For. Res.* 127; 89–101.  
 249 doi:10.1007/s10342-007-0186-2
- 250 LARA; W.; BRAVO; F.; MAGUIRE; D.A.; 2013. Modeling patterns between drought and tree biomass  
 251 growth from dendrochronological data: A multilevel approach. *Agric. For. Meteorol.* 178–179;

- 252 140–151.
- 253 LINARES; J.C.; CAMARERO; J.J.; 2012. From pattern to process: Linking intrinsic water-use efficiency to  
254 drought-induced forest decline. *Glob. Chang. Biol.* 18; 1000–1015.
- 255 LINARES; J.C.; CAMARERO; J.J.; Carreira; J.A.; 2009. Plastic responses of *Abies pinsapo* xylogenesis to  
256 drought and competition. *Tree Physiol.* doi:10.1093/treephys/tpp084
- 257 MAGRUDER; M.; CHHIN; S.; PALIK; B.; BRADFORD; J.B.; 2013. Thinning increases climatic resilience of  
258 red pine. *Can. J. For. Res.* 43; 878–889. doi:10.1139/cjfr-2013-0088
- 259 MARTÍN-BENITO; D.; DEL RÍO; M.; HEINRICH; I.; HELLE; G.; CAÑELLAS; I.; 2010. Response of climate-  
260 growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *For. Ecol.*  
261 *Manage.* 259; 967–975. doi:10.1016/j.foreco.2009.12.001
- 262 MARTÍN; D.; VÁZQUEZ-PIQUÉ; J.; FERNÁNDEZ; M.; ALEJANO; R.; 2014. Effect of ecological factors on  
263 intra-annual stem girth increment of holm oak. *Trees - Struct. Funct.* doi:10.1007/s00468-014-  
264 1041-y
- 265 MARTÍNEZ-VILALTA; J.; LÓPEZ; B.C.; LOEPFE; L.; LLORET; F.; 2012. Stand- and tree-level determinants  
266 of the drought response of Scots pine radial growth. *Oecologia* 168; 877–888.  
267 doi:10.1007/s00442-011-2132-8
- 268 PEGUERO-PINA; J.J.; SANCHO-KNAPIK; D.; MARTÍN; P.; SAZ; M.Á.; GEA-IZQUIERDO; G.; CAÑELLAS; I.;  
269 GIL-PELEGRÍN; E.; 2015. Evidence of vulnerability segmentation in a deciduous Mediterranean  
270 oak (*Quercus subpyrenaica* E. H. del Villar). *Trees* 29; 1917–1927. doi:10.1007/s00468-015-  
271 1273-5
- 272 PINHEIRO; J.C.; BATES; D.; 2000. *Mixed-effects models in S and SpluS*. Springer; New York.
- 273 PRETZSCH; H.; DEL RÍO; M.; AMMER; C.; AVDAGIC; A.; BARBEITO; I.; BIELAK; K.; BRAZAITIS; G.; COLL;  
274 L.; DIRNBERGER; G.; DRÖSSLER; L.; FABRIKA; M.; FORRESTER; D.I.; GODVOD; K.; HEYM; M.;  
275 HURT; V.; KURYLYAK; V.; LÖF; M.; LOMBARDI; F.; MATOVIĆ; B.; MOHREN; F.; MOTTA; R.; DEN  
276 OUDEN; J.; PACH; M.; PONETTE; Q.; SCHÜTZE; G.; SCHWEIG; J.; SKRZYSZEWSKI; J.; SRAMEK; V.;  
277 STERBA; H.; STOJANOVIĆ; D.; SVOBODA; M.; VANHELLEMONT; M.; VERHEYEN; K.; WELLHAUSEN;  
278 K.; ZLATANOV; T.; BRAVO-OVIEDO; A.; 2015. Growth and yield of mixed versus pure stands of  
279 Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a  
280 productivity gradient through Europe. *Eur. J. For. Res.* doi:10.1007/s10342-015-0900-4
- 281 PRETZSCH; H.; SCHÜTZE; G.; 2009. Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of  
282 Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation  
283 on individual tree level. *Eur. J. For. Res.* 128; 183–204. doi:10.1007/s10342-008-0215-9
- 284 PRETZSCH; H.; SCHÜTZE; G.; UHL; E.; 2013. Resistance of European tree species to drought stress in  
285 mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol.*  
286 doi:10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x
- 287 RÍO; M. DEL; STERBA; H.; 2009. Comparing volume growth in pure and mixed stands of *Pinus*  
288 *syvestris* and *Quercus pyrenaica*. doi:10.1051/forest/2009035>
- 289 SOHN; J.A.; GEBHARDT; T.; AMMER; C.; BAUHUS; J.; HÄBERLE; K.-H.; MATYSSEK; R.; GRAMS; T.E.E.;  
290 2013. Mitigation of drought by thinning: Short-term and long-term effects on growth and  
291 physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *For. Ecol. Manage.* 308; 188–197.  
292 doi:10.1016/j.foreco.2013.07.048
- 293 SOHN; J.A.; HARTIG; F.; KOHLER; M.; HUSS; J.; BAUHUS; J.; 2016a. Heavy and frequent thinning  
294 promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. *Ecol. Appl.* 26; 2190–2205.  
295 doi:10.1002/eap.1373
- 296 SOHN; J.A.; SAHA; S.; BAUHUS; J.; 2016b. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A  
297 meta-analysis. *For. Ecol. Manage.* 380; 261–273. doi:10.1016/j.foreco.2016.07.046
- 298 VAN DER MAATEN; E.; 2013. Thinning prolongs growth duration of European beech (*Fagus sylvatica* L.)  
299 across a valley in southwestern Germany. *For. Ecol. Manage.* doi:10.1016/j.foreco.2013.06.030
- 300 VIEIRA; J.; ROSSI; S.; CAMPELO; F.; FREITAS; H.; NABAIS; C.; 2014. Xylogenesis of *Pinus pinaster* under  
301 a Mediterranean climate. *Ann. For. Sci.* doi:10.1007/s13595-013-0341-5
- 302 ZWEIFEL; R.; ZIMMERMANN; L.; NEWBERY; D.M.; 2005. Modeling tree water deficit from microclimate:  
303 an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiol.* 25; 147–156.
- 304