



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-007

---

---

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Fenología del crecimiento secundario de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en zonas de clima contrastado de la Península Ibérica

VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.-<sup>1</sup>, ALEJANO, R. <sup>1</sup>, CALAMA, R. <sup>2</sup>, NATALINI, F. <sup>1</sup>, MADRIGAL, G., CONDE, M. y PARDOS, M. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva

<sup>2</sup> INIA-CIFOR. Dpto. Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales

### Resumen

El conocimiento detallado del crecimiento secundario de las especies forestales y su fenología tiene una amplia aplicación tanto a la gestión forestal como a la predicción de las estrategias de adaptación de las especies frente a procesos de cambio global. En este trabajo se analiza el crecimiento secundario y fenología de pino piñonero en dos poblaciones de clima contrastado: Cartaya (Huelva) y Nava del Rey (Valladolid). El análisis se realiza a tres escalas: mensual mediante la medición a esta escala de dendrómetros de banda instalados en 50 individuos por parcela; diaria, mediante la instalación de dendrómetros electrónicos en 3 individuos por parcela. En Cartaya la especie tiene un máximo de crecimiento primaveral, parada y contracción estival del tronco y crecimiento y/o hidratación otoñal. El cese de actividad cambial en invierno no es evidente. En Nava del Rey (Valladolid) la parada invernal es más clara pero la fase de crecimiento primaveral ha sido muy reducida o inexistente, debido principalmente a defoliación producida por un ataque de procesionaria. Las variables climáticas más influyentes en el crecimiento son la humedad relativa media y mínima y la precipitación, que se correlacionan positivamente con el crecimiento en todas las fases fenológicas, la radiación, con correlación negativa en todas las fases fenológicas, y la temperatura mínima y media del aire y la temperatura del suelo, que se correlacionan positivamente con el crecimiento en la fase de expansión otoñal.

### Palabras clave

Dendrómetros electrónicos, dendrómetros de banda, micromuestras, cambium.

### 1. Introducción

El pino piñonero, *Pinus pinea* L., es una especie emblemática de los sistemas forestales mediterráneos, ocupando en España una superficie superior a las 400,000 ha (MONTERO et al. 2008), en un amplio rango de condiciones ecológicas y climáticas. Las masas forestales de pino piñonero se consideran un ejemplo de multifuncionalidad en la gestión, pues constituyen una importante fuente de servicios ecosistémicos, entre los que destacan la producción de piña y piñón, producción de leñas y madera, fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico, uso recreativo y paisajístico y protección frente a la erosión

El conocimiento del crecimiento de las especies forestales tiene importancia no solo por su relación con la producción de madera sino que tiene una implicación mucho más amplia: el crecimiento refleja el estado vegetativo de los árboles, indica cómo se distribuyen los recursos en el árbol, influye en otros procesos fenológicos y de producción de fruto y muestra la respuesta de los árboles ante cambios en las variables ecológicas. Por todo ello, el conocimiento detallado del crecimiento secundario de las especies forestales y su fenología tiene implicación a distintos niveles: (1). El conocimiento del crecimiento de los bosques y su evolución en el tiempo es la base para la planificación de las actuaciones selvícolas en los mismos en el marco de una gestión sostenible; (2). Permite mejorar las funciones crecimiento-clima presentes en los modelos ecosistémicos y de dinámica forestal más generales, que normalmente son empíricos. (3) Permite profundizar y adquirir conocimientos más precisos del papel que juegan estas masas como fijadoras de CO<sub>2</sub> atmosférico y su evolución estacional y (4) Permite realizar simulaciones de crecimiento de las especies frente a distintos escenarios de cambio climático. que pueden ser

utilizadas como herramienta para estudiar su vulnerabilidad ante procesos de cambio en las condiciones ecológicas.

El análisis del crecimiento secundario puede realizarse en distintas escalas temporales, desde días hasta décadas. La aproximación tradicional dendroclimatológica, basada en la relación entre parámetros climáticos como temperatura y precipitación y la anchura de los anillos de crecimiento, tiene una escala como mínimo anual. En este tipo de estudios los factores climáticos son normalmente recogidos en estaciones meteorológicas distantes de las masas estudiadas y los factores edáficos no son tenidos en cuenta debido a la falta de registros continuos y a la falta de caracterización suficiente de los suelos. Sin embargo, es una aproximación adecuada si queremos analizar las tendencias de crecimiento de la especie en las últimas décadas y detectar diferencias en la vulnerabilidad entre distintas zonas geográficas, lo que podría llevar a proponer distintas medidas adaptativas de gestión. En este sentido, la dendrocronología se ha utilizado para analizar los efectos de la sequía en la reducción del incremento de área basimétrica (DI FILIPPO et al., 2010), para estudiar la mortalidad de los árboles en relación a la disminución del crecimiento (NATALINI et al. 2016b) o como resultado de episodios de estrés hídrico prolongado (BRESHEARS et al., 2009) o para analizar la variación de las relaciones clima-crecimiento motivadas por el proceso de cambio climático en las últimas décadas (NATALINI et al. 2015; NATALINI et al. 2016a).

Una aproximación más detallada al análisis clima-crecimiento radica en la utilización de dendrómetros de lectura manual, dispositivos que, abrazando al árbol o colocados en un punto del mismo, permiten conocer a intervalos regulares el crecimiento del individuo. Ello posibilita trabajar a escalas temporales inferiores al año (bimensuales, mensuales, quincenales) y proporciona una mayor sensibilidad al análisis. Esta aproximación es relativamente frecuente por su reducido coste (LAGERGREN & LINDROTH, 2004). La aproximación de escala más detallada de la relación entre los factores ambientales y el crecimiento es la utilización de medidas continuas de crecimiento (SCHWEINGRUBER, 1996). Hoy en día los dendrómetros electrónicos permiten la medición continua de la actividad cambial en árboles con precisión de micras a escalas temporales que pueden variar desde segundos a días. Los dendrómetros electrónicos también permiten observar oscilaciones diarias en el diámetro del tronco, que han sido explicados por la variación en el contenido de agua (KRAMER & KOZLOWSKI, 1979). Posteriormente se ha verificado una estrecha relación entre las oscilaciones diarias y los procesos de transpiración y flujo de savia (MCLAUGHLIN et al., 2003) e igualmente se han relacionado incrementos negativos de diámetro del tronco durante varios días con carencias hídricas en la planta (WORBES, 1999). Todo ello indica la posibilidad de relacionar los valores de oscilación diaria suministrados por dendrómetros con variables de naturaleza climática y ecofisiológica.

La principal desventaja de ambos tipos de dendrómetro es la interpretación de los resultados obtenidos: las mediciones no permiten distinguir entre el crecimiento de floema, xilema o peridermis, y tampoco permite diferenciar este crecimiento, motivado por la adición de nuevas células, de los patrones diarios de contracción y dilatación del tronco (TARDIF et al., 2001). El análisis histológico periódico, mediante la extracción de muestras del conjunto xilema-floema-peridermis, a pesar de ser laboriosa, permite establecer mejor la duración del periodo de actividad cambial. Debido a las ventajas y desventajas de ambos métodos es ampliamente reconocido el interés de utilizarlos conjuntamente para tener un conocimiento detallado de la influencia del clima en los periodos de actividad vegetativa del árbol (DESLAURIERS et al., 2003).

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es profundizar en el conocimiento de la fenología del crecimiento secundario y de las relaciones clima-crecimiento de la especie. Este objetivo general se desglosa en tres objetivos específicos:

- Cuantificar las diferencias y variabilidad en el crecimiento diametral a escala intraanual del pino piñonero en los dos sitios de ensayo de clima contrastado.
- Describir las pautas anuales de crecimiento, la duración y fases del periodo vegetativo.
- Relacionar estos aspectos con variables edáficas (temperatura y humedad de suelo) y climáticas.

### 3. Material

#### 3.1 Sitios de ensayo

El estudio se ha realizado en dos parcelas situadas en masas monoespecíficas de pino piñonero en Cartaya (CY, Huelva) y Nava del Rey (NR, Valladolid). La parcela de CY ( $37^{\circ}23'13''\text{N}$ ,  $7^{\circ}11'52''\text{W}$ ) se encuentra en una zona llana a 130 msnm, tiene 0.6 ha de superficie, una densidad de 85 pies  $\text{ha}^{-1}$ , área basimétrica de  $9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , diámetro medio cuadrático de 37.3 cm y altura media de 15.1 m. La parcela de NR ( $41^{\circ}26'33''\text{N}$ ,  $5^{\circ}2'34''\text{W}$ ) se encuentra en zona llana a 715 msnm, tiene 0.7 ha de superficie, densidad de 74 pies  $\text{ha}^{-1}$ , área basimétrica de  $7.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , diámetro medio cuadrático de 36.2 cm y altura media de 8.8 m. El suelo de CY es un Planosol y el de NR un Arenosol. La cobertura de matorral es muy escasa en ambas parcelas.

El clima de ambas parcelas es contrastado (Figura 1). En CY la temperatura media anual es de  $16.8^{\circ}\text{C}$ , la temperatura media de las mínimas del mes más frío de  $4.7^{\circ}\text{C}$ , la precipitación media anual de 507 mm, el periodo de sequía de 4.7 meses y carece de periodo de helada segura, mientras que en NR la temperatura media anual es de  $11.8^{\circ}\text{C}$ , la temperatura media de las mínimas del mes más frío de  $-1.7^{\circ}\text{C}$ , la precipitación media anual de 433 mm, el periodo de sequía de 3.6 meses y posee 3 meses de helada segura (datos del periodo 2001-2015 de la estación meteorológica de Cartaya (Huelva) de la Red de Alerta e Información Fitosanitaria de la Junta de Andalucía, situada a 5.6 km de la parcela de estudio, y de la estación de Tordesillas (Valladolid) de la red Inforiego de la Junta de Castilla y León situada a 7.6 km de la parcela de estudio). El índice de termicidad (RIVAS-MARTÍNEZ, 1987) es 370 en CY (termomediterráneo superior) y 192 en NR (supramediterráneo inferior).

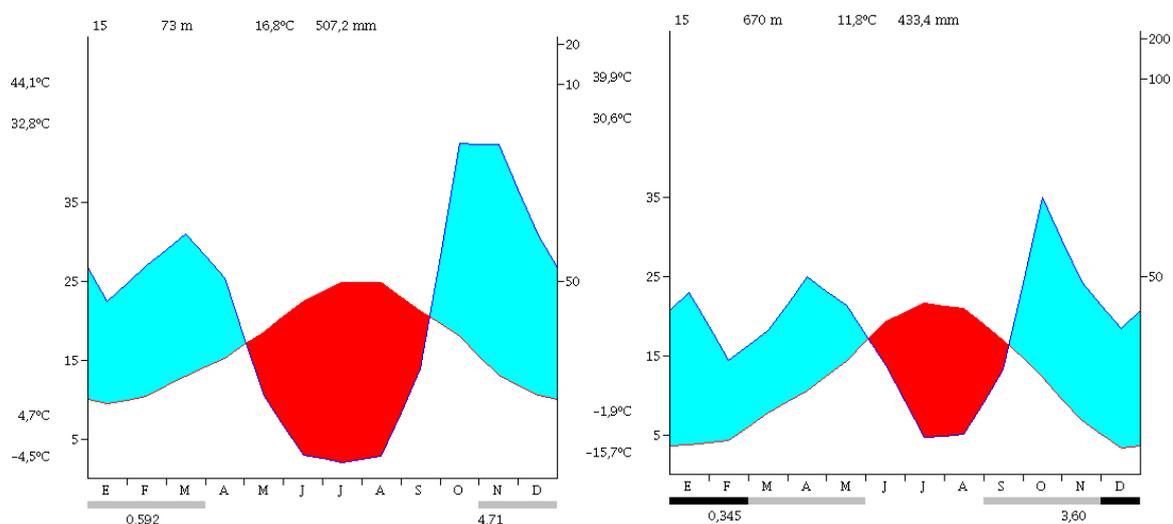


Figura 1. Climodiagramas de las estaciones de Cartaya (izquierda) y Tordesillas (derecha). Periodo 2001-15

#### 3.2. Dispositivo experimental y adquisición de datos

El dispositivo experimental es similar en las dos parcelas. Los dispositivos instalados para la medición del crecimiento son de dos tipos:

- Dendrómetros de banda de aluminio, de fabricación propia, situados en el tronco en una zona sin deformaciones y a una altura próxima a 1.3 m. Estos dendrómetros se instalaron

en 50 individuos de la parcela de CY y 53 individuos en la parcela de NR en Febrero de 2014, en pies que presentasen un buen estado fitosanitario y troncos sin excesivas deformaciones. Las mediciones de crecimiento se realizan con periodicidad mensual con calibre digital con precisión de 0,01 mm.

- Dendrómetros electrónicos potenciométricos, de fabricación propia, en 3 individuos por parcela con toma de datos programada cada 15 min y precisión de 4 micras.

El dispositivo incluye la medición de temperatura de suelo y humedad de suelo (sensores de humedad ECH20©) a dos profundidades (10-30, 30-50 cm) en un punto de cada parcela cada 15 min. Las variables climáticas diarias se obtuvieron de las estaciones indicadas en el punto 3.1. Las variables consideradas fueron: precipitación (mm), temperatura del aire máxima, media y mínima (°C), humedad relativa máxima, media y mínima (%), radiación (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>) y velocidad de viento media y máxima (m s<sup>-1</sup>).

Con periodicidad quincenal se tomaron micromuestras del conjunto xilema-cambium-floema en 6 individuos de cada parcela con un TREPHER®. Los individuos muestreados en cada parcela se mantuvieron constantes en todo el periodo de estudio. Las muestras se introdujeron en el momento de la extracción en tubos eppendorf de 2.5 mL rellenos de una mezcla de agua destilada y alcohol al 50% y se mantuvieron refrigerados hasta el momento de su preparación en laboratorio.

Se analiza en este estudio el periodo de mediciones que transcurre desde Febrero de 2014 hasta Noviembre de 2016 correspondiente a los datos adquiridos con dendrómetros de banda y electrónicos.

## 4. Metodología

### 4.1. Evolución del crecimiento a escala mensual

Con los datos obtenidos de crecimientos mensuales con dendrómetros de banda se ha elaborado un modelo lineal mixto con el objetivo de analizar la influencia del individuo, la parcela, el año y el mes, así como las interacciones entre la parcela, el año y el mes en el crecimiento a escala mensual de la especie. La variable dependiente utilizada ha sido el crecimiento diario de sección normal, con objeto de corregir las diferencias en número de días de cada mes. El modelo tiene la siguiente estructura inicial:

$$y_{ijkm} = \mu + \alpha_i + b_{j(i)} + \tau_k + \eta_m + (\alpha | \tau | \eta)_{ikm} + e_{ijk}$$

con:

$y_{ijkm}$ : Crecimiento diario en mm<sup>2</sup> del árbol j de la parcela i en el mes k del año m;  $\mu$ : media general;  $\alpha_i$ : efecto fijo parcela;  $b_{j(i)}$ : Efecto aleatorio árbol (dentro de parcela) con  $j = 1, 2, \dots$  e  $i = 1, 2$  bajo las hipótesis  $b_{j(i)} \sim N(0, \sigma_b^2)$  y covarianzas nulas entre distintos individuos;  $\tau_k$ : efecto fijo mes de medición con  $k = 1, 2, 3, \dots, 12$ ;  $\eta_m$ : efecto fijo año, con  $m = 1, 2$ ;  $(\alpha | \tau | \eta)_{ikm}$ : conjunto de interacciones dobles y triples entre efectos fijos;  $e_{ijk}$ : error residual con hipótesis de distribución normal.

El modelo inicial es un modelo lineal mixto con efecto aleatorio árbol y efectos fijos parcela, año, mes y todas sus interacciones. La estructura de los datos indica la posible presencia de correlación espacial entre individuos de una misma parcela y correlación entre observaciones tomadas en distintos meses en un mismo individuo, por lo que se han experimentado distintas estructuras de la matriz de varianzas-covarianzas para el conjunto de los datos que tienen en consideración la existencia de correlación temporal. La estructura espacial no se ha analizado para este trabajo, por lo que se considera covarianza espacial nula entre individuos. La selección del mejor modelo ha seguido el siguiente proceso: (1) Consideración de efecto aleatorio a nivel árbol y selección de la mejor estructura de la matriz de varianzas covarianzas incluyendo hipótesis de no independencia entre observaciones tomadas en un individuo y varianzas heterogéneas entre meses de medición. Se han considerado diferentes tipos de matrices de varianzas-covarianzas como la autoregresiva de orden 1, toeplitz homogénea y heterogénea con varias bandas, simétrica compuesta heterogénea, antedependiente de orden 1, no estructurada

y no estructurada diagonal. (2) Análisis de significación del efecto aleatorio a nivel árbol. Los componentes de la varianza para cada una de las estructuras de la matriz de varianzas-covarianzas se han estimado por máxima verosimilitud restringida o residual (REML). Para analizar la mejor estructura de modelo se han comparado los valores del criterio de información de Akaike (AIC) indicando menores valores un mejor ajuste. Tras la selección de la mejor estructura de la matriz de varianzas-covarianzas y la estimación de los componentes de la varianza se ha realizado la estimación de los coeficientes de los efectos fijos del modelo (parcela, mes, año e interacciones) por mínimos cuadrados generalizados y analizado su nivel de significación mediante un test F. Los test de comparaciones múltiples entre niveles de los distintos factores se han realizado con el test de Scheefe considerando  $\alpha=0.05$ . El análisis estadístico se ha realizado con SAS v9.2.

#### 4.2 Evolución del crecimiento a escala diaria

Para cada uno de los individuos con dendrómetro electrónico se calculó la variación diaria del radio del tronco ( $\Delta R$ ,  $\mu\text{m}$ ) después de dividir el ciclo diario de oscilación del radio en tres fases (DESLAURIERS et al., 2003): (1) fase de contracción (periodo entre el máximo valor de radio de tronco de la mañana y el mínimo de la tarde); (2) fase de expansión (periodo entre el valor mínimo de la tarde y el máximo del día siguiente); (3) fase de incremento de radio del tronco (parte de la fase de expansión desde el momento en el que el radio supera el máximo de la mañana hasta el siguiente máximo). La diferencia entre la máxima expansión y el comienzo de la 3ª fase representa el  $\Delta R$  positivo. Cuando el máximo valor del día anterior no se alcanza,  $\Delta R$  es negativo y no se define la fase 3 de incremento del radio. La máxima contracción diaria (MCD,  $\mu\text{m}$ ) se calcula como la diferencia entre el mínimo de la tarde y el máximo de la mañana (Figura 2). El cálculo de los ciclos,  $\Delta R$  y MCD se realizó mediante una rutina escrita en SAS v.9.2., derivada de la rutina de DESLAURIERS et al., 2011.

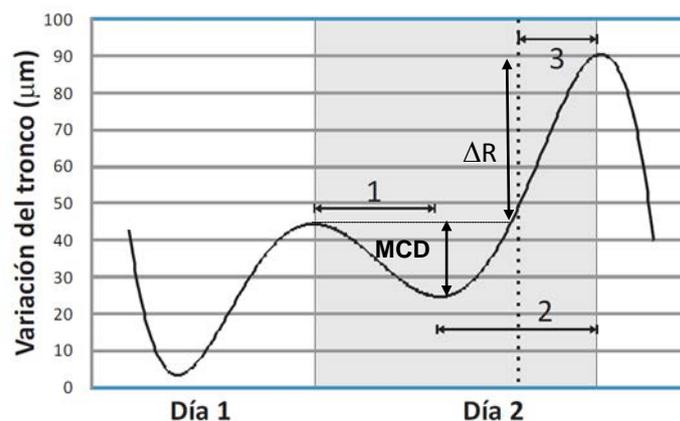


Figura 2. Definición de las fases que componen el ciclo diario de oscilación del radio del tronco. 1: fase de contracción, 2: fase de expansión, 3: fase de incremento.  $\Delta R$ : Variación diaria del diámetro del tronco. MCD: Máxima contracción diaria

Para cada zona se analizaron visualmente la series temporales de evolución del radio del tronco de los 3 individuos para determinar el comienzo y finalización de los 4 estados fenológicos de crecimiento secundario (TARDIF et al., 2001): (I) expansión de primavera, (II) nula expansión o contracción estival, (III) fase de rápida rehidratación y expansión otoñal y (IV) reducción o cese de la expansión de fin de otoño e invierno. Para cada zona y para cada estado fenológico se calculó el coeficiente de correlación bootstrap de Spearman entre la variable  $\Delta R$  y las variables climáticas. Se calcularon igualmente los intervalos de confianza al 95% de probabilidad para analizar la significación del coeficiente y si los coeficientes de correlación estimados son significativamente distintos entre los dos lugares de ensayo. Las variables climáticas consideradas fueron precipitación (P, mm), temperatura del aire máxima, media y mínima (TAmx, TAméd, TAmín, °C), humedad relativa máxima, media y mínima (HRmax, HRmed, HRmin,

%), radiación (RAD, MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>), velocidad de viento media y máxima (Ws, Wsmax, m s<sup>-1</sup>), Temperatura de suelo media (TS, °C), agua extraíble del suelo relativa entre 10 y 30 cm, entre 30 y 50 cm y entre 10 y 50 cm (REW10, REW30, REW10\_50, %). El agua relativa extraíble (REW, %) se calculó como:

$$REW (\%) = 100 \frac{WC - WC_{\min}}{WC_{CC} - WC_{\min}}$$

donde WC (mm) es el contenido de agua del suelo (mm) a la profundidad considerada, WC<sub>min</sub> es el contenido mínimo de agua del suelo medido en el periodo de estudio a la profundidad considerada (mm), WC<sub>CC</sub> es el contenido de agua del suelo en capacidad de campo. WC<sub>CC</sub> se consideró como el contenido de agua del suelo tras 48 h de un evento intenso de precipitación en un periodo en el que el suelo se encuentra saturado de agua.

## 5. Resultados

### 5.1. Evolución de las principales variables climáticas durante el periodo de estudio

La evolución durante el periodo de estudio de la temperatura media y de la temperatura media de las mínimas indica el marcado contraste térmico entre las dos zonas de estudio (Figura 3). La temperatura media de las mínimas es unos 5°C inferior en NR durante todo el año, mientras que la temperatura media es unos 5°C inferior en invierno y 2°C inferior en verano. El invierno 2014-15 fue más frío que el 2015-15, registrándose temperaturas medias de las mínimas inferiores de 2 a 5°C en el primer periodo frente al segundo. Las precipitaciones fueron muy escasas en el invierno-primavera de 2015 en ambas zonas, alcanzándose valores muy bajos de agua relativa extraíble ya en el mes de abril de 2015. El periodo octubre 2015- mayo 2016 registró una pluviosidad más elevada en ambas zonas, favoreciendo una mayor recarga del suelo, que alcanzó sus valores máximos en enero-2016 en NR y en mayo-2016 en CY. Esa mayor recarga produjo que los valores registrados en ambas zonas en julio-2016 fueran similares a los existentes en abril-2015.

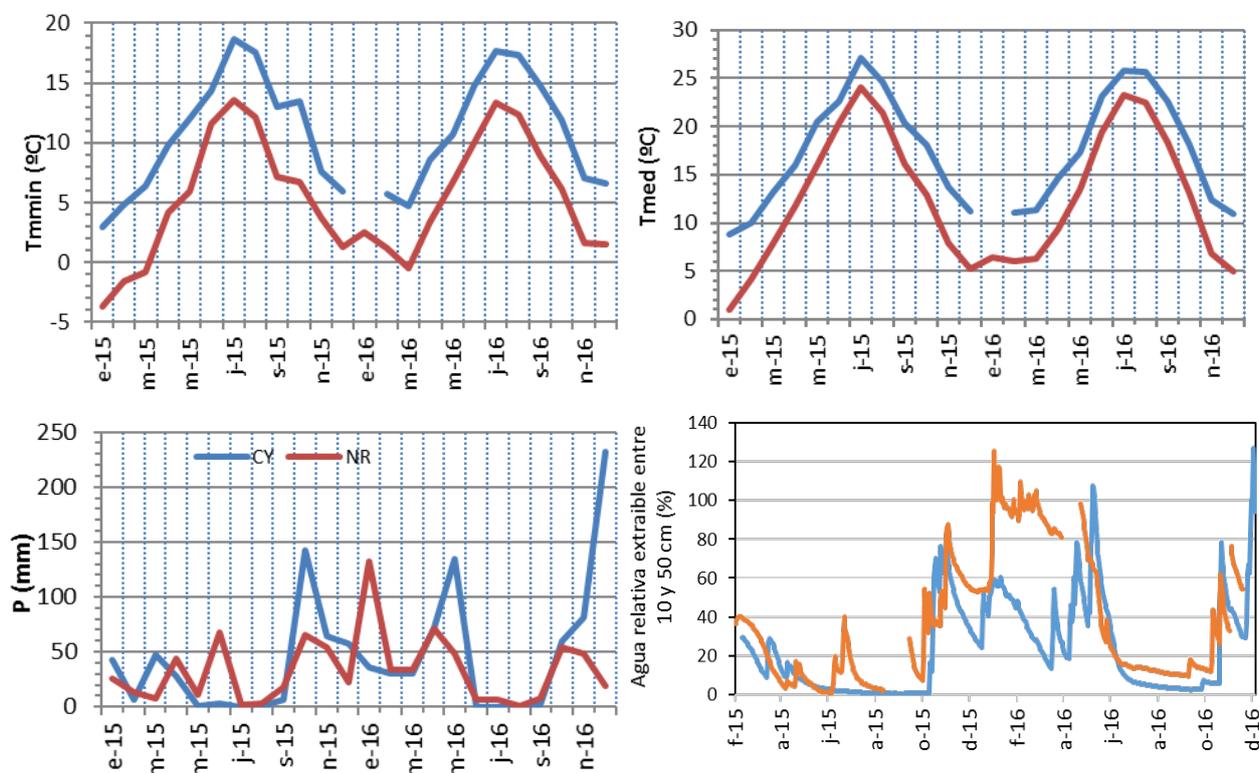


Figura 3. Evolución de la temperatura media de las mínimas ( $T_{min}$  (°C) arriba, izquierda), temperatura media ( $T_m$  (°C), arriba, derecha), precipitación ( $P$  (mm), abajo, izquierda) y agua relativa extraíble entre los 10 y 50 cm de profundidad (% , abajo, derecha) en las dos parcelas durante el periodo de estudio

## 5.2. Crecimiento a escala mensual

El modelo seleccionado es el que incorpora una matriz de varianzas-covarianzas de tipo toeplitz heterogénea de 3 bandas, lo que indica la heterogeneidad de la varianza a nivel mensual, con valores muy superiores en los periodos de máximo crecimiento, y correlación temporal significativa en periodos de 3 meses. Todos los factores fijos e interacciones analizadas son altamente significativas. Los crecimientos son mayores en la parcela de Cartaya ( $29.9 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$  frente a  $14.6 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$  en NR) y en el año 2016 ( $32.7 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$  frente a  $15.8 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$  en 2015). Los valores estimados de evolución del crecimiento en los dos años revelan las marcadas diferencias entre sitios y entre años (Figura 4). El patrón es claramente bimodal en CY, con crecimiento en invierno-primavera, detención del crecimiento y contracción en verano, rehidratación y expansión en otoño y reducción del crecimiento en invierno. En el año 2015 la parada estival se produjo ya prácticamente en el mes de abril mientras que en 2016 no se produjo hasta junio. En NR destaca que en toda la primavera de 2016 no se produjo crecimiento y que en mayo de 2015, que es el primer dato del que se dispone, el crecimiento ya había cesado. La expansión del otoño sí se produce los dos años analizados

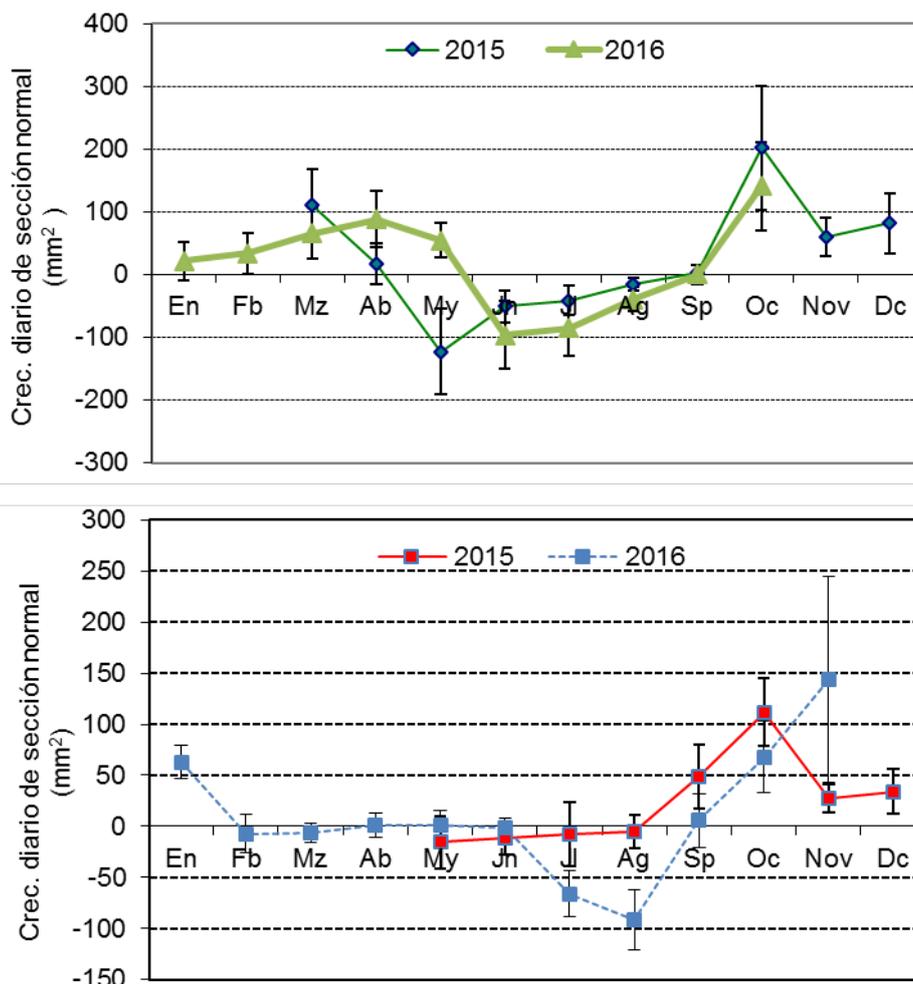


Figura 4. Valores estimados mínimo cuadráticos de crecimiento diario de sección normal en Cartaya (arriba) y Nava del Rey (abajo). Las barras indican el error estándar en la estimación

### 5.3. Crecimiento a escala diaria

La variación radial del tronco a escala diaria indica con mayor detalle los patrones fenológicos de la especie y el contraste entre las zonas analizadas (Figura 5). En el caso de CY se aprecian claramente los estados fenológicos I, II y III, y sus resultados concuerdan con los indicados en el análisis a escala mensual, apreciándose que en mayo de 2015 los árboles estaban ya claramente en la fase II mientras que en 2016 se encontraban en la fase de máximo crecimiento. El estado fenológico IV no se distingue de forma clara del estado III, apreciándose una ralentización en el crecimiento pero no un cese total claro. En NR la fase IV es clara y prolongada en comparación a la de CY y comienza a principios de noviembre. En el caso de NR en los dos años de estudio la fase I es inexistente en dos de los tres árboles analizados y se ha definido en relación al árbol que sí que llega a presentarla, aunque con valores de crecimiento pequeños con relación a los árboles de CY.

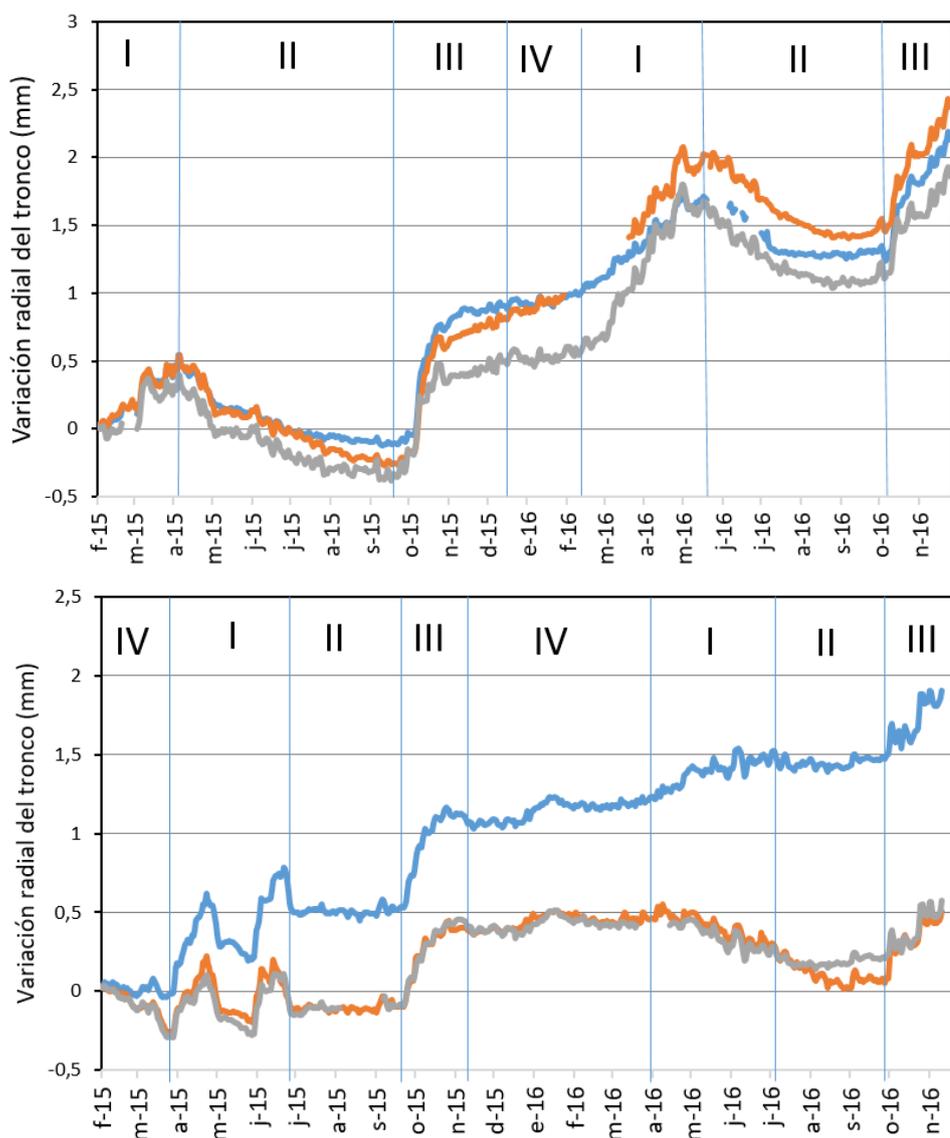


Figura 5. Variación radial del tronco en el periodo de estudio en Cartaya (arriba) y Nava del Rey (abajo), con indicación de las 4 fases fenológicas

Las variables climáticas que tienen una mayor correlación con la expansión diaria son la Humedad relativa mínima y media (correlación positiva en todas las fases fenológicas) y la

Radiación (correlación negativa en todas las fases fenológicas) (Tabla 1). También destaca la correlación positiva con la precipitación, especialmente en las fases I y III, fundamentalmente en NR y la correlación positiva con Temperatura media y mínima con la fase III, pero no con la temperatura máxima.

Tabla 1. Coeficientes de correlación bootstrap de Spearman entre los valores de crecimiento diario y las variables climáticas y edáficas por parcela y fase fenológica. Los valores en negrita indican coeficientes significativamente distintos de cero al 95% de probabilidad. Los valores en rojo indican diferencias significativas (95% de probabilidad) en el valor del coeficiente de correlación entre parcelas dentro de una fase fenológica. TS: Temperatura de suelo media (°C); REW10, REW30, REW10\_50: agua extraíble del suelo relativa entre 10 y 30 cm, entre 30 y 50 cm y entre 10 y 50 cm (%). TAmáx, TAméd, TAmín temperatura del aire máxima, media y mínima (°C); P, precipitación (mm), Hrmax, Hrmed, Hrmin humedad relativa máxima, media y mínima (%), RD: radiación (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>); Ws, Wsmax velocidad de viento media y máxima (m s<sup>-1</sup>)

Variable	Fases fenológicas							
	I		II		III		IV	
	CY	NR	CY	NR	CY	NR	CY	NR
TS	-0,06	<b>-0,14</b>	<b>0,08</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,23</b>	<b>0,25</b>	0,08	-0,01
RE10	0,01	<b>0,10</b>	<b>-0,12</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,15</b>	<b>-0,14</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,14</b>
RE30	0,01	-0,02	<b>-0,08</b>	<b>-0,14</b>	<b>0,12</b>	<b>-0,11</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,15</b>
REW10_50	0,01	0,06	<b>-0,09</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,14</b>	<b>-0,13</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,15</b>
TAmáx	<b>-0,21</b>	<b>-0,27</b>	<b>-0,17</b>	<b>-0,28</b>	0,02	0,06	-0,13	<b>-0,22</b>
TAméd	<b>-0,14</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,08</b>	<b>-0,20</b>	<b>0,29</b>	<b>0,31</b>	0,06	-0,02
TAmín	<b>-0,06</b>	<b>0,17</b>	<b>0,09</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,33</b>	<b>0,36</b>	0,04	<b>0,16</b>
P	<b>0,21</b>	<b>0,43</b>	<b>0,08</b>	<b>0,20</b>	<b>0,17</b>	<b>0,38</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,25</b>
Hrmax	<b>0,09</b>	0,00	0,03	0,00	-0,02	<b>0,14</b>	<b>-0,13</b>	<b>0,12</b>
Hrmed	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,23</b>	<b>0,24</b>	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>	<b>0,16</b>	<b>0,29</b>
Hrmin	<b>0,33</b>	<b>0,39</b>	<b>0,32</b>	<b>0,38</b>	<b>0,36</b>	<b>0,26</b>	<b>0,25</b>	<b>0,36</b>
RD	<b>-0,33</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,29</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,29</b>	<b>-0,36</b>
Ws	<b>-0,06</b>	<b>0,20</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>	0,08	0,01	-0,01
Wsmax	<b>-0,01</b>	<b>0,18</b>	0,05	<b>0,09</b>	0,10	-0,01	-0,03	-0,01

## 6. Discusión

El pino piñonero muestra patrones de crecimiento muy diferentes en los dos periodos vegetativos analizados y en las dos zonas de estudio de clima contrastado. En CY la especie sigue un patrón de crecimiento bimodal con un máximo crecimiento en primavera, donde los recursos hídricos del suelo se muestran como un factor esencial en la extensión y finalización de esta fase fenológica. En el caso de que la recarga del suelo haya sido muy limitada, como ocurrió en el invierno y primavera de 2015, la finalización del crecimiento debido a la falta de agua puede suceder ya en el mes de abril mientras que puede prolongarse hasta junio en aquellos años donde las precipitaciones de invierno y primavera den lugar a una recarga mayor del suelo. Esta variabilidad en la extensión, intensidad y finalización de la fase de crecimiento de primavera (fase I) es un hecho extendido y típico en especies que se desarrollan dentro del clima mediterráneo debido a la elevada variabilidad interanual en el régimen de precipitaciones (CAMPELO et al., 2007; MARTÍN et al., 2014). Por el contrario, en NR el crecimiento de primavera ha sido prácticamente nulo en el periodo de estudio. En el caso del primer periodo vegetativo (2015), el reducido crecimiento puede deberse a la limitación de recursos hídricos (ver Figura 2) pero en el caso del segundo (2016), con recursos hídricos suficientes para la iniciación del crecimiento, el nulo crecimiento experimentado por la mayoría de los árboles parece debida a la defoliación, en ocasiones muy intensa, producida por un ataque de procesionaria (*Thaumtopoea pityocampa*).



La parada de crecimiento estival ha comenzado con niveles de agua relativa extraíble por debajo del 10-15%, si bien en NR y en 2016 no se ha podido diferenciar de la fase anterior en dos de los tres árboles analizados. CHERUBINI et al. (2003) consideran esta fase II un periodo de reposo originada por la falta de agua más que un periodo de inactividad vegetativa. Sin embargo, cuando la fase de contracción del tronco debida a estrés hídrico se produce no se puede determinar con seguridad a través de los datos proporcionados por los dendrómetros de banda o electrónicos si la actividad cambial se ha detenido por completo.

La fase III, o fase de expansión otoñal se ha producido en ambas parcelas, y su inicio coincide con las primeras precipitaciones que se producen en otoño, al igual que señalan otros estudios en especies mediterráneas (MARTÍN et al. 2014; CORCUERA et al., 2004). Los rápidos incrementos iniciales en el radio del tronco son debidos probablemente solo a un proceso de hidratación. Sin embargo, cuando después de este fenómeno el diámetro del tronco se estabiliza en un valor superior al máximo alcanzado en la primavera anterior, se puede suponer que se ha producido un segundo periodo de crecimiento en el año, como sucede en otoño de 2016 en ambas parcelas. Los resultados obtenidos en encina por CAMPELO et al. (2006, 2007), GUTIÉRREZ et al. (2011) y CHERUBINI et al. (2003) sugieren que hay una relación entre este segundo periodo de crecimiento y la aparición de fluctuaciones intraanuales en la densidad de la madera y/o la existencia de dobles anillos, especialmente cuando hay una sequía muy intensa seguida de eventos de precipitación intensa al final del verano. Resultados similares para *Arbutus unedo* y *Erica arborea* en otras zonas de clima mediterráneo han sido reseñados por BATTIPAGLIA et al. (2010, 2014).

La diferenciación entre la fase III y la fase IV es poco clara en el caso de la parcela de CY, al menos en los datos observados en el invierno de 2015-2016, en el que las suaves temperaturas parecen indicar que la actividad cambial no cesó por completo, mientras que en NR, con temperaturas invernales notablemente más bajas que en CY, la fase IV está mejor definida y se prolonga más en el tiempo. El crecimiento observado en enero de 2016, reflejado tanto en los dendrómetros de banda como en los electrónicos parece deberse a las intensas precipitaciones que produjeron una hidratación del tronco, más que a actividad cambial. Estos hechos deben ser corroborados con el análisis de la actividad cambial que se obtenga de las micromuestras extraídas con periodicidad quincenal en las parcelas.

Las variables climáticas que ejercen una mayor influencia en el crecimiento diario ( $\Delta R$ ) y actúan en el mismo sentido en todas las fases fenológicas son, por un lado, la humedad relativa mínima y media y, por otro, la radiación. Valores más elevados de la humedad relativa mínima (que suele alcanzarse al comienzo de la tarde) y media se relacionan con déficit de saturación menores y menor tendencia evapotranspirativa (KÖCHER et al., 2012), lo que disminuiría la contracción diaria y favorecería un crecimiento neto del radio. Por otro lado, la correlación negativa con la radiación podría ser debido a un efecto de fotoinhibición (CORCUERA et al., 2005), pero dado que se produce en todas las fases fenológicas y también en condiciones de poco estrés para el árbol parece más lógico relacionar los valores elevados de radiación con condiciones de evapotranspiración elevada, lo que aumenta la pérdida de agua, y como consecuencia, aumenta la contracción diaria y reduce el crecimiento. La precipitación es otro factor que se correlaciona positivamente con el crecimiento, fundamentalmente en las fases I y III, que corresponden a las de expansión radial. Este hecho remarca la importancia de la disponibilidad de agua cuando el cambium se encuentra activo (Molz et al., 1973; Köcher et al., 2012). La temperatura media y mínima del aire y la temperatura del suelo parecen tener un papel destacado en la fase de expansión otoñal (fase III). Un vez que la expansión comienza tras los primeros eventos de precipitación tras la sequía estival, parece que temperaturas mínimas y medias más elevadas juegan un papel destacado en la intensificación del crecimiento.

## 7. Conclusiones

El pino piñonero tiene patrones fenológicos con elevada variabilidad interanual y espacial. En la zona de Cartaya (Huelva) la especie tiene un máximo de crecimiento primaveral, parada y

contracción estival del tronco por falta de recursos hídricos y crecimiento y/o hidratación otoñal. En el periodo estudiado la finalización de la fase de expansión otoñal no es muy clara por lo que la fase de cese de actividad cambial en invierno no es evidente, sugiriendo que el cambium puede permanecer activo en la época invernal. En Nava del Rey (Valladolid) la parada invernal es mucho más clara pero la fase de crecimiento primaveral ha sido muy reducida o inexistente, debido principalmente a defoliación producida por un ataque de procesionaria.

Las variables climáticas más influyentes en el crecimiento son la humedad relativa media y mínima y la precipitación, que se correlacionan positivamente con el crecimiento en todas las fases fenológicas, la radiación, con correlación negativa en todas las fases fenológicas, y la temperatura mínima y media del aire y la temperatura del suelo, que se correlacionan positivamente con el crecimiento en la fase de expansión otoñal.

Con los dendrómetros de banda y electrónicos utilizados no es posible determinar con exactitud si las variaciones en las dimensiones del tronco detectadas en otoño corresponden únicamente a hidratación o a la suma de hidratación y producción de nuevas células por actividad cambial, por lo que su combinación con el análisis de la xilogénesis mediante la extracción de micromuestras periódicas es esencial para detallar la fenología de la especie.

La combinación de datos proporcionados por dendrómetros de banda y electrónicos es una potente herramienta que va a permitir en futuros estudios la elaboración de modelos explicativos y/ o predictivos que pueden ser utilizados para mejorar la gestión de la especie y analizar su vulnerabilidad frente al proceso de cambio climático, y, por otro lado, relacionar el crecimiento y oscilaciones diarias de la dimensión del tronco con procesos ecofisiológicos.

## 8. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la Unión Europea a través del proyecto RTA-2013-00011-C02, “Vulnerabilidad y adaptación de los pinares de *Pinus pinea* frente al cambio climático”. Agradecemos la colaboración prestada por Javier Gordo y los Agentes Forestales de la comarca de Tordesillas en el establecimiento y toma de datos de la parcela de Nava del Rey (Valladolid).

## 9. Bibliografía

- BATTIPAGLIA G, DE MICCO V, BRAND WA, LINKE P, ARONNE G, SAURER M, CHERUBINI P., 2010. Variations of vessel diameter and  $\delta^{13}C$  in false rings of *Arbutus unedo* L. reflect different environmental conditions. *New Phytol* 188:1099–1112
- BATTIPAGLIA G, DE MICCO V, BRAND WA, SAUREN M, ARONNE G, LINKE P, CHERUBINI P, 2014. Drought impact on water use efficiency and intra-annual density fluctuations in *Erica arborea* on Elba (Italy). *Plant Cell Environ* 37:382–391.
- BRESHEARS DD, MYERS OB, MEYER CW, BARNES FJ, ZOU CB, ALLEN CD, MCDOWELL NG, POCKMAN WT, 2009. Tree die-off in response to global-change type drought: Mortality insights from a decade of plant water-potential measurements. *Frontiers Ecol Environ* 7: 185-189.
- CAMPELO, F., NABAIS, C., FREITAS, H., GUTIÉRREZ, E., 2006. Climatic significance of tree ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.* 64, 229–238.
- CAMPELO F, GUTIÉRREZ E, RIBAS M, NABAIS C, FREITAS H., 2007. Relationships between climate and double rings in *Quercus ilex* from northeast Spain. *Can J For Res* 37:1915–1923.
- CHERUBINI P, GARTNER BL, TOGNETTI R, BRÄKER OU, SCHOCH W, INNES JL., 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biol Rev* 78:119–148.
- CORCUERA, L., CAMARERO, JJ., GIL-PELEGRIN, E., (2004). Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees* 18:83–92.

- DESLAURIERS, A.; MORIN, H.; URBINATI, C.; 2003. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forest of Québec (Canada). *Trees* 17, 477–484.
- DESLAURIERS, A., ROSSI, S., ANFODILLO, T., 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: what kind of information can be inferred? *Dendrochronología* 25, 113–124.
- DESLAURIERS, A., ROSSI, S., TURCOTTE, A., MORIN, H., KRAUSE, C., 2011. A three-step procedure in SAS to analyze the time series from automatic dendrometers. *Dendrochronología* 29, 151–161.
- DOWNES, G., BEADLE, C., WORLEDGE, D., 1999. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. *Trees* 14, 102–111.
- DI FILIPPO, A., ALESSANDRINI, A., BIONDI, F., BLASI, S., PORTOGHESI, L., PIOVESAN, G., 2010. Climate change and oak growth decline: Dendroecology and stand productivity of a Turkey oak (*Quercus cerris* L.) old stored coppice in Central Italy. *Ann For Sci.* 67(7):706.
- GUTIÉRREZ E, CAMPELO F, CAMARERO JJ, RIBAS M, MUNTÁN E, NABAIS C, FREITAS H., 2011. Climate controls act at different scales on the seasonal pattern of *Quercus ilex* L. stem radial increments in NE Spain. *Trees* 25:637–646.
- KÖCHER, P., HORNA, V., LEUSCHNER, C., 2012. Environmental control of daily stem growth patterns in five temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiol.* 32, 1021–1032.
- KRAMER, P.J., KOZLOWSKI, T.T., 1979. Physiology of woody plants. Academic Press, New York.
- LAGERGREN, F., LINDROTH, A., 2004. Variation in sapflow and stem growth in relation to tree size, competition and thinning in a mixed forest of pine and spruce in Sweden. *For. Ecol. Manage.* 188, 51-63.
- MARTÍN, D., VÁZQUEZ-PIQUÉ, J., FERNÁNDEZ, M., ALEJANO, R., 2014. Effect of ecological factors on intra-annual stem girth increment of holm oak. *Trees* 28 (5): 1367-1381.
- MCLAUGHLIN, S.B., WULLSCHLEGER, S.D., NOSAL, M., 2003. Diurnal and seasonal changes in stem increment and water use by yellow poplar trees in response to environmental stress. *Tree Physiology* 23, 1125-1136.
- MONTERO, G., CALAMA R, RUIZ PEINADO R., 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En MONTERO G., SERRADA R, REQUE J (Eds.) Compendio de Selvicultura de Especies, pp 431-470. INIA – Fundación Conde del Valle de Salazar.
- MOLZ, F.J., KLEPPER, B., PETERSON, C.M., 1973. Rehydration versus growth-induced water uptake in plant tissues. *Plant Physiol.* 51, 859–862.
- NATALINI, F., CORREIA, A., VÁZQUEZ-PIQUÉ, J., ALEJANO, R., 2015. Tree rings reflect growth adjustments and enhanced synchrony among sites in Iberian stone pine (*Pinus pinea* L.) under climate change. *Ann For Sci.* 72(8): 1023-1033.
- NATALINI, F., ALEJANO, R., VÁZQUEZ-PIQUÉ, J., PARDOS, M., CALAMA, R., BÜNTGEN U., 2016a. Spatiotemporal variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) growth response to climate across the Iberian Peninsula. *Dendrochronología.* 40: 72-84.
- NATALINI, F., ALEJANO, R., VÁZQUEZ-PIQUÉ, J., CAÑELLAS, I., GEA-IZQUIERDO, G., 2016b. The role of climate change in the widespread mortality of Holm oak in open woodlands of Southwestern Spain. *Dendrochronología* 38:51-60.
- SCHWEINGRUBER, F.H.; 1996. Tree rings and environment dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. 609 pp. Berne
- TARDIF, J., FLANNIGAN, M., BERGERON, Y., 2001. An analysis of the daily radial activity of 7 boreal tree species, northwestern Quebec. *Environ. Monit. Assess.* 67, 141–160.
- WORBES, M., 1999. Annual growth rings, rainfall dependent growth and long term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* 391-403.