



Universidad de Valladolid

Escuela Técnica Superior
de Ingenierías Agrarias

Campus de Palencia

Máster en Investigación en Ingeniería para la Conservación y Uso Sostenible
de Sistemas Forestales

Análisis de los patrones de crecimiento radial de masas de *Pinus pinaster* Ait. en respuesta a la variabilidad climática

Presentada por:
José Guillermo Riofrío Salazar

Tutores:
Felipe Bravo Oviedo
Andrés Bravo-Oviedo

Agradecimientos

Este trabajo y mi formación en la Universidad de Valladolid han sido financiados por la beca otorgada dentro del programa de formación del talento humano de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno Nacional de la República del Ecuador.

Quiero agradecer a Felipe Bravo y Andrés Bravo por su confianza y por darse el tiempo para responder a mis inquietudes a pesar de sus apretadas agendas, espero haber satisfecho las expectativas.

A Jorge Olivar, Wilson Lara y Roy Vera, por sus sugerencias y aportaciones durante el desarrollo de este trabajo, sinceramente hay ayudado mucho.

A todos los amigos de Palencia y de la Universidad: Encarna, Carmen, Lucía, Irene, Wilson, Vivien, Mori, Toni, Temesgen, Frankiln, Marco, Iñaki, Dani..... por todas las mañanas de café y tardes de cañas que han hecho mi estancia mucho más llevadera y por hacerme sentir más cerca de casa.

A mis padres, a mis hermanas, familia y amigos en Ecuador, que a pesar de la distancia siempre han estado presentes y aunque suelo desaparecer del mapa, sin su apoyo sería infinitamente más difícil.

A Ximena, por su por su sonrisa que siempre me ha motivado a continuar.

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivos	5
Materiales y métodos	5
Sitio de estudio	5
Construcción de cronologías	6
Datos climáticos	9
Relaciones entre variables climáticas y crecimiento	9
Resultados	10
Variabilidad y tendencias climáticas	10
Descripción de cronologías	11
Patrones de crecimiento	12
Relación entre clima y crecimiento	15
Análisis dinámico de las respuestas al clima	17
Discusión	18
Conclusiones	22
Bibliografía	23
Anexo 1. Anexo fotográfico	28
Anexo 2. Análisis estadístico	30

Resumen

La región Mediterránea se define como una zona de transición climática con alta sensibilidad ante los efectos del cambio climático. Las distintas respuestas que dicho cambio provoca sobre el crecimiento de las masas forestales se pueden evidenciar al estudiar la variación de las relaciones entre el crecimiento radial y el cambio de los factores climáticos durante los últimos años. Con el objetivo de evaluar si la relación clima-crecimiento es dependiente de la edad y determinar si existe un efecto significativo en los patrones de crecimiento inicial, se realizó el análisis dendroclimático de masas procedentes de repoblaciones de *Pinus pinaster* Ait., jóvenes (18 años) y adultos (53 años), ubicadas en la provincia de Ciudad Real. Se tomaron barrenas en las masas adultas y rodajas en las masas jóvenes de 10 individuos en 6 puntos a lo largo del fuste. Ambos grupos de edad tuvieron una respuesta diferenciada frente a las condiciones climáticas y mostraron un incremento de la variabilidad del crecimiento radial a partir de 1995. La correlación y función de respuesta de las variables climáticas estacionales sobre el crecimiento mostró una dependencia de la edad y del período de análisis, lo que indica una relación cambiante con el clima a través del tiempo. Los árboles adultos fueron más sensibles a la influencia climática que los árboles jóvenes. Finalmente, el análisis de respuestas mediante ventanas móviles permitió detectar un incremento en la sensibilidad de los árboles adultos a los eventos de sequía previos y en el inicio de la estación de crecimiento.

Palabras clave: dendrocronología, variabilidad climática, patrones de crecimiento, análisis temporal, *P. pinaster*.

Abstract

The Mediterranean region is defined as a climatic transition zone with high sensitivity to climate change effects. Different responses triggered in growth forest can be evidenced by analyzing the relationship between radial growth and climate change in recent years. In order to assess whether the climate-growth relationship is age dependent and to establish any significant change on early growth patterns, we performed a dendroclimatic analysis from a forestation stands of *Pinus pinaster* Ait., young (18 years old) and old (53 years old), located in the province of Ciudad Real. Increment cores and cross-sections were taken in old and young stands from 10 trees at 6 points along the stem. Both age classes had a different response to climate conditions and showed increased growth variability from 1995. Correlation and response function analysis presented an age and period dependent, this showed a change in the growth-climate relationship during the same period. Old trees were more sensitive to climatic influence than young trees. Further, responses function analysis by moving intervals allowed us to detect an increase in the sensitivity of adult trees to drought events before and at the start of the growing season.

Keywords: dendrocronology, climatic variability, growth patterns, temporal analysis, *P. pinaster*

Introducción

Desde hace tiempo se ha documentado que las técnicas dendrocronológicas son utilizadas para evaluar las relaciones entre clima y crecimiento, así los anillos de los árboles son los registros más frecuentemente utilizados en reconstrucciones climáticas (Biondi, 2000; Speer, 2010). Entre las principales ventajas del uso de anillos de crecimiento como indicadores del cambio o variabilidad climática están su capacidad para fechar con precisión las perturbaciones, la existencia de patrones de variabilidad interanual sincronizados a escala espacial y temporal, la creciente disponibilidad de una extensa red de cronologías en diferentes ecorregiones, y la posibilidad de utilizar modelos lineales simples para relacionar el clima con el crecimiento que pueden ser verificados y calibrados con facilidad (Hughes, 2002).

Sin embargo, aún persisten algunas incertidumbres con frecuencia relacionadas con los complejos mecanismos fisiológicos mediante los cuales los parámetros climáticos se traducen en variaciones del crecimiento radial, ya que el crecimiento de un año determinado y sus patrones de respuesta se ven determinados por factores tales como el microclima (Fritts, 1976), crecimiento del año previo, edad de los árboles, (Linderholm & Linderholm, 2004), tamaño de los individuos (Campelo et al., 2012), nivel de competencia (Olivar et al., 2012), densidad del rodal (Olivar et al., 2013), calidad de sitio (Tardif et al., 2003), altitud (Wang et al., 2013), estado sanitario (Viguera Moreno, 2012), vulnerabilidad al estrés hídrico (Sánchez-Salguero et al., 2012) y estas relaciones también pueden diferir entre especies, además la asociación estadística entre el clima y el crecimiento de los anillos puede cambiar en el tiempo (D'Arrigo et al., 2008).

A pesar que se conoce que durante el crecimiento algunas características morfológicas y fisiológicas en los árboles difieren entre los estados juveniles y adultos (Bond, 2000; Day et al., 2002), aún no se conoce con certeza si las relaciones del clima con el crecimiento son controladas por la edad del árbol y cómo los cambios en los procesos fisiológicos asociados al envejecimiento pueden alterar estas relaciones. Las investigaciones que han probado si la respuesta crecimiento-clima es estable a través de diferentes grupos de edad, no son concluyentes debido a la amplia variedad de los resultados reportados. Por un lado, se han observado diferencias en las funciones de respuesta entre árboles adultos y jóvenes en algunas especies, como *Larix decidua* (Carrer & Urbinati, 2004), *Juniperus thurifera* (Rozas et al., 2009), en cambio una respuesta consistente en la relación clima-crecimiento entre grupos de

edad se ha encontrado en *Pinus aristata* Engelm (Fritts, 1976) *Pinus nigra* y *Pinus uncinata* (Dorado Liñán et al., 2011), incluso resultados discrepantes para *Pinus cembra* han sido reportados en distintos estudios (Carrer & Urbinati, 2004; Esper et al., 2008).

El calentamiento climático está influyendo negativamente en el crecimiento y el vigor de los pinos mediterráneos, desencadenando episodios de decaimiento, que afectan especialmente a las especies más sensibles al estrés por sequía (Camarero et al., 2004; Andreu et al., 2007). Los bosques de coníferas de montaña en el centro-sur de España podrían ser algunos de los más vulnerables a este efecto inducido por el cambio climático (Linares et al., 2009), debido principalmente a que se encuentran en los sitios con baja capacidad de retención de agua en el suelo (Vanderlinden et al. 2005) y por la notable reducción en la disponibilidad de agua en esta zona en la últimas décadas (De Luis et al., 2009).

El pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) es una especie característica de los ambientes mediterráneos es la segunda especie arbórea en extensión superficial en España (1,6 millones de hectáreas). , donde forma masas monoespecíficas y mixtas en pinares tanto naturales como en repoblaciones. La subespecie de la región mediterránea es de crecimiento lento (turnos de 80-120 años) y de ella se obtiene madera de calidad, sin embargo en algunas zonas, la existencia de pies muy torcidos limita el uso de la madera para este fin (Rodríguez et al., 2008). *P. pinaster* es una especie adaptada a la variabilidad de los ambientes mediterráneos, y a pesar que se ve afectada por eventos de sequía es mucho más resistente que otras especies de pinos distribuidos en el mediterráneo, lo que la convierten en especialmente valiosa para la producción forestal (Sánchez-Salguero et al., 2012). Adicionalmente, se la considerada una especie viable para estudios dendrocronológicos por que ha mostrado respuestas consistentes a factores ambientales y gran plasticidad de su crecimiento en función de la disponibilidad de agua, a pesar de que rodales de más de 100 años de edad son difíciles de encontrar y la mayoría han sido dañados por la cosecha de resina en el pasado (Schweingruber, 1993; Bogino et al., 2009a).

El entendimiento de cómo la variabilidad climática de las últimas décadas ha afectado los patrones de crecimiento de los bosques mediterráneos es relevante para evaluaciones de impacto y proyecciones a largo plazo (Sabaté et al., 2002). Para ello se debe determinar si los factores que inciden en la sensibilidad del crecimiento muestran una respuesta homogénea a las variaciones climáticas. En este sentido

conocer si conforme se incrementa la edad de los individuos los cambios estructurales y funcionales relacionados con la ontogenia modifican las respuestas del clima al crecimiento puede ser determinante. En este estudio se establecieron dos hipótesis de trabajo; i) la sensibilidad y respuesta de los patrones crecimiento de *P. pinaster* a las variables climáticas son dependientes de la edad, y ii) existe un cambio significativo en los patrones de crecimiento inicial de *P. pinaster* debido a cambios en las condiciones climáticas.

Objetivos

El objetivo principal en este estudio es determinar la sensibilidad y respuesta de masas procedentes de repoblaciones de *Pinus pinaster* Ait. a la variabilidad climática, mediante un análisis dendroclimático de las tendencias de los patrones de crecimiento de individuos de distinta edad.

Como objetivos específicos se plantearon:

- Identificar si existen diferentes respuestas en los patrones de crecimiento entre masas con distintas edades durante el período común de crecimiento.
- Comparar el crecimiento radial inicial entre las masas que crecieron en diferentes períodos de tiempo y de esta forma determinar el efecto de la variabilidad climática en los patrones de crecimiento.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El sitio de estudio corresponde a los montes de Fuencaliente, ubicados en la Sierra Morena de la provincia de Ciudad Real. Las condiciones climáticas son típicas del clima Mediterráneo con veranos secos y precipitación máxima entre otoño e invierno, la temperatura media anual es de 15.2°C y la precipitación media anual de 480mm (Fig. 1).

Se seleccionaron dos masas de repoblaciones de *Pinus pinaster* Ait., localizadas a 1.76 km de distancia, con condiciones ambientales similares pero de edades diferentes, adultos de 50 años y jóvenes de 20 años aproximadamente. Diez árboles

de cada masa fueron muestreados durante mayo del 2012, se tomaron testigos o canutillos pareados con la barrena Pressler en las masas adultas y se cortaron rodajas de los árboles jóvenes. Se tomaron muestras en 6 puntos a lo largo del fuste: en la base, altura normal, base de la copa, punta delgada (7 cm), en los puntos medios comprendidos entre la altura normal y base de la copa, y entre la base de la copa y altura en punta delgada.

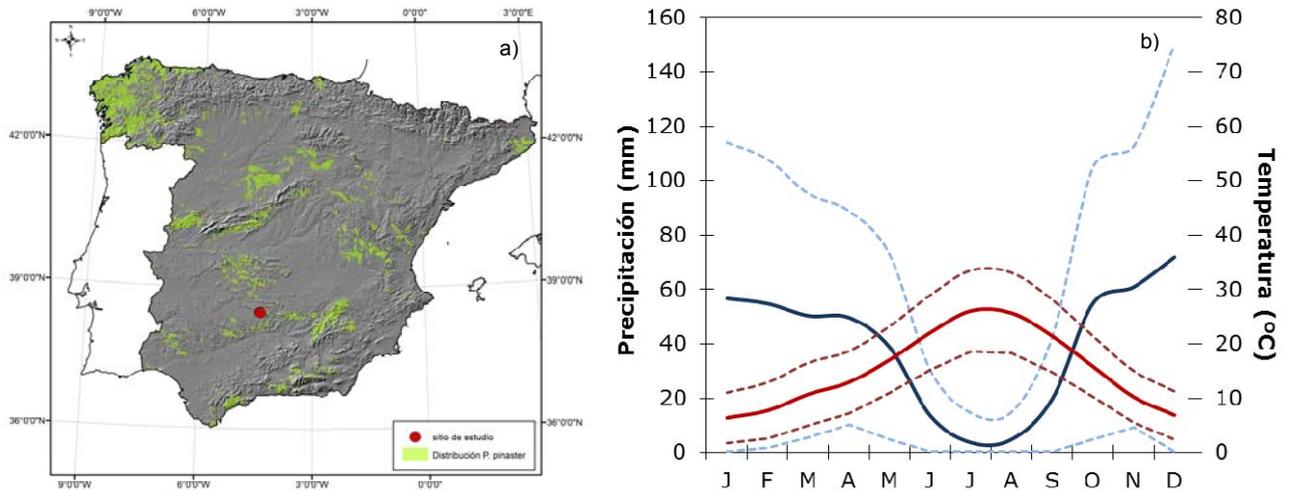


Figura. 1. a) Ubicación del sitio de estudio sobre la distribución *P. pinaster*. **b)** Diagrama climático con el valor medio mensual de precipitación (línea azul) y temperatura (línea roja) para el período 1950-2007, datos extraídos del modelo Spain02 (Herrera et al., 2012). Las líneas discontinuas azules marcan \pm una desviación estándar de la precipitación y líneas discontinuas rojas muestran la temperatura media mensual máxima y mínima.

Construcción de cronologías

Los testigos o canutillos se secaron al aire y se montaron en soportes de madera sobre su sección transversal para facilitar la observación de los anillos, posteriormente tanto testigos como rodajas se lijaron progresivamente con lijas de grano fino hasta que se pudieron diferenciar las paredes celulares con un microscopio binocular (Speer, 2010) (Anexo 1).

Con el uso de un escáner Epson Expresion 1640XL se obtuvieron imágenes digitales de las secciones transversales de los testigos y rodajas a una resolución 1100pdi y precisión de 0,01mm, el ancho de los anillos se midió con el programa WinDENDRO

(REGENT INSTRUMENT INC., 2002). Las muestras fueron datadas para determinar el año de formación de cada anillo partiendo del último año de crecimiento, la sincronía de las cronologías se comprobó visualmente siguiendo el procedimiento de datación cruzada estándar a través de la identificación de una secuencia de anillos característicos (Speer, 2010).

La datación cruzada fue validada con el programa COFECHA V6.06P, que calcula el grado de sincronía o correlación de cada series individual con la cronología maestra elaborada con el resto de series, mediante segmentos consecutivos parcialmente solapados (Grissino-Mayer, 2001). La correcta datación de los anillos es esencial para el análisis dendroclimático de las series, así para maximizar la señal de las variables climáticas y minimizar el efecto de series con anillos atípicos se descartaron las series individuales que tuvieron una correlación inferior a 0,4 con la cronología maestra.

Usualmente los canutillos extraídos en los muestreos dendrocronológicos no siempre alcanzan la médula del árbol, debido a la incorrecta alineación de la barrena, una corta longitud de barrenado, o por la excentricidad de forma del fuste. Por lo que la edad real a la altura de muestreo se estimó posteriormente por el método gráfico propuesto por Rozas (2003), basado en la convergencia de los radios del xilema en la médula utilizando los canutillos parciales que presentan arcos de anillos concéntricos al centro geométrico del árbol. El número de anillos en el segmento faltante se estimó considerando un crecimiento radial constante en el tiempo y se calculó dividiendo la longitud del radio perdido para la tasa de crecimiento medio de los 5 anillos adyacentes al arco más grande visible en cada barrena.

El crecimiento radial de los árboles jóvenes tiende a ser más rápido que el de los árboles maduros, para eliminar la tendencia del crecimiento debida a la edad las series deben ser estandarizadas. El proceso de estandarización "*detrending*" consiste en ajustar una función matemática que recoja dicha tendencia, la serie residual obtenida del cociente entre los valores del ancho de los anillos observados y los valores predichos por la función es un índice adimensional o índice de crecimiento, cuya variabilidad se atribuye principalmente al clima (Fritts, 1976). Las series individuales de árboles jóvenes y adultos se estandarizaron con una función spline suavizada, la rigidez de la función se ajustó de acuerdo a la longitud de las cronologías, 20 años para las series de árboles jóvenes y 60 para los árboles adultos. La spline suavizada considera la autocorrelación de la serie, además no solo elimina la tendencia atribuida a la edad, sino también la variabilidad de alta frecuencia ocasionada por cambios

abruptos biológicos o debidos al manejo (podas, claras), por lo que el procedimiento de doble estandarización habitualmente utilizado no es necesario (Helama et al., 2004; Speer, 2010; Viguera Moreno, 2012).

Para la estandarización de las series se utilizó el programa estadístico R v.2.15.2 (<http://www.R-project.org/>) con la librería *dpIR* (Bunn, 2008) para aplicaciones dendrocronológicas. Para la construcción de las cronologías se aplicó un modelo autoregresivo a cada serie para descartar la autocorrelación relacionada con el crecimiento del año previo. Finalmente las cronologías medias de cada grupo de edad se obtuvieron del promedio de los índices de crecimiento usando una media robusta doblemente ponderada en la cual los valores con ± 6 desviaciones estándar no contribuyen al cálculo de la media, esto reduce la varianza y el sesgo causado por valores atípicos en las series (Cook, 1985). De esta forma se obtuvieron las cronologías de los anillos de crecimiento y cronologías residuales libres de autocorrelación de los dos grupos de edad para el análisis dendroclimático (Anexo 2).

La calidad de las cronologías del ancho de anillos se evaluó con la media del grosor de los anillos, la desviación estándar (SD), y la autocorrelación de primer orden (AC) que mide la similitud del crecimiento año a año y (r) la correlación media entre todas las series con la cronología maestra. Para valorar las cronologías residuales o índices de crecimiento se calcularon: la sensibilidad media (MS, Eq 1) como medida de la variabilidad interanual del grosor de los anillos, (r_{bt}) la similitud en el crecimiento entre árboles que cuantifica la similitud en el crecimiento entre individuos y (EPS, Eq 2) la señal expresada por la población que es una medida de la calidad estadística de la cronología medida en comparación con la cronología teórica de la población (Speer, 2010; Cook & Pederson, 2011).

$$MS_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right| \quad [1]$$

donde X es el ancho de aho en el año t , X_{t+1} es el ancho de anillo del siguiente año, y n es el número de años que se están comparando, valores alrededor de 0.2 se consideran como series con sensibilidad climática.

$$EPS_t = \frac{t * r_{bt}}{t * r_{bt} + (1 - r_{bt})} \quad [2]$$

donde t es el número de árboles representados con una única serie cada uno de ellos, r_{bt} es la correlación media entre árboles, se considera que una cronología es fiable cuando el valor del $EPS > 0,85$.

Datos climáticos

Las variables climáticas usadas fueron la media mensual de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, los datos fueron extraídos de la base de datos Spain02 (Herrera et al., 2012) que corresponde a una rejilla de 20 km de resolución que cubre el territorio peninsular y las islas Baleares, en la que se han interpolado los datos diarios de precipitación y temperatura de más de 2000 estaciones de Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para el período 1950-2007, disponible en http://escenarios.aemet.es/escenarios/Ind_dat_rejilla_20km.html

Se calcularon los valores estacionales de precipitación y temperatura de invierno (W, Diciembre, Enero y Febrero), primavera (SP, Marzo, Abril y Mayo), verano (SM, Junio, Julio y Agosto) y otoño (AU, Septiembre, Octubre y Noviembre). Adicionalmente se calculó el índice de aridez (DRI) (Thornthwaite, 1948; Maliva & Missimer, 2012), para los valores mensuales y estacionales, el DRI se calculó con la fórmula:

$$DRI = P - PET / PET \quad [3]$$

donde P es la precipitación mensual y PET es la evapotranspiración potencial estimada a partir de la temperatura media mensual y un factor dependiente de la posición latitudinal del sitio de estudio. Por lo tanto, los valores más bajos (más altos) de DRI indican mayor (menor) déficit de agua.

Relaciones entre variables climáticas y crecimiento

Para determinar las variables climáticas que controlan el crecimiento, los análisis más utilizados en dendrocronología son la función de correlación y función de respuesta, que consisten en una secuencia de coeficientes calculados entre los índices de crecimiento obtenidos después del “*detrending*” y las variables climáticas de interés, ordenados desde el año previo hasta la temporada actual de crecimiento. En la función de correlación los coeficientes son estimaciones univariantes de la correlación simple de Pearson, mientras que en la función de respuesta los coeficientes son estimaciones

multivariantes de un modelo de regresión por componentes principales (Fritts, 1976; Biondi & Waikul, 2004). Sin embargo, los niveles normales de significación de los coeficientes pueden ser mal interpretados debido a que las estimaciones del error son subestimadas, por lo tanto, algunos coeficientes erróneamente pueden pasar la prueba de significación (Biondi & Waikul, 2004). Como solución, un método de remuestreo “*bootstrapping*” es comúnmente utilizado para obtener resultados precisos para las funciones de respuesta y correlación (Guiot, 1991).

El análisis de la relación entre clima y crecimiento de *P. pinaster* se realizó con la librería *bootRes* (Zang & Biondi, 2013) disponible dentro de R (R Development Core Team, 2010). Los datos mensuales y estacionales de precipitación, temperatura y DRI fueron contrastados con las series residuales de árboles jóvenes y adultos, se consideró como período de análisis desde marzo (primavera) del año previo hasta noviembre (otoño) del año de crecimiento, debido a que en este rango se cubre el período más influyente para el crecimiento radial de *P. pinaster* (Richter et al., 1991; Camarero et al., 2010) (Anexo 2).

La metodología de *bootstrapping* calcula los coeficientes después de 1000 iteraciones extraídas al azar, los coeficientes se consideran significativos ($p < 0.05$) cuando su valor absoluto es de al menos dos veces su desviación estándar (Biondi & Waikul, 2004). Adicionalmente se evaluó la estabilidad de las relaciones entre crecimiento y clima en el tiempo, se obtuvieron los coeficientes de correlación y respuesta en ventanas móviles de 20 y 10 años para los árboles adultos y jóvenes respectivamente.

Resultados

Variabilidad y tendencias climáticas

El clima de la zona presentó temperaturas máximas en verano y mínimas en invierno, precipitaciones más escasas en verano, con un período de sequía estival en julio y agosto, sin embargo se observó que la variabilidad interanual fue mucho más amplia en los meses de mayor precipitación que en la época estival (Fig. 1). En cuanto a las tendencias interanuales (Fig.2) se distinguió un incremento de la temperatura máxima y mínima acentuado en las últimas décadas con valores superiores a la media del período 1950-2007. La precipitación e índice de aridez no mostraron una tendencia marcada a largo plazo, sin embargo se pudo distinguir algunos eventos de sequía

importante ($DRI < -1.4$) en 1954, 1980 y 2005, y años con alta disponibilidad de agua ($DRI > 1.4$) en 1963, 1969, 1976, 1996 y 1997, sin embargo estacionalmente los valores presentaron grandes diferencias.

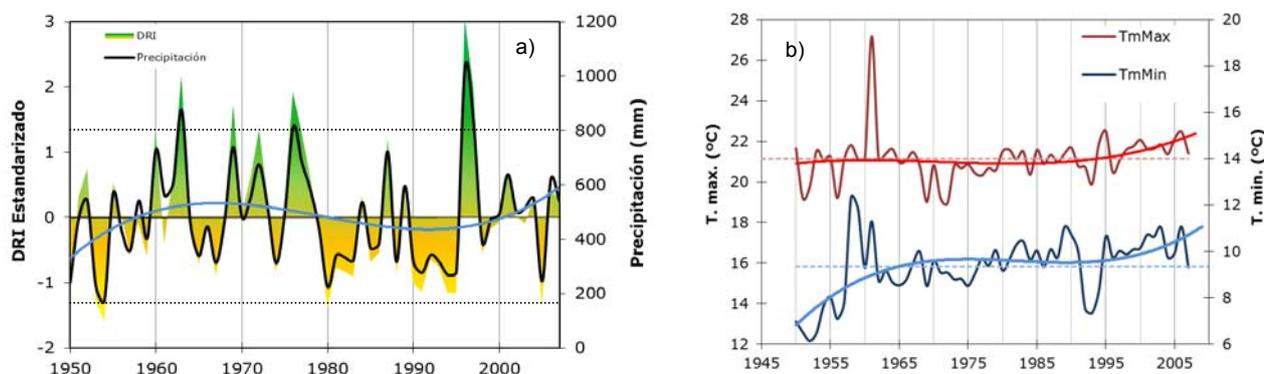


Figura. 2. Variabilidad climática interanual, **a)** Precipitación anual (línea negra) y tendencia (línea azul) e índice de aridez estandarizado (DRI). **b)** Temperatura media máxima (línea roja oscura) y temperatura media mínima (línea azul oscura) y sus respectivas tendencias. Las líneas punteadas representan los valores medios de la precipitación y temperaturas máxima y mínima entre 1950-2007.

Descripción de cronologías

Las series individuales de árboles adultos y jóvenes mostraron patrones comunes en el crecimiento (Fig.3), la correlación media de las series con la cronología maestra fue de 0,68 y 0,58 en árboles adultos y jóvenes respectivamente, solamente se excluyó una serie de los árboles jóvenes porque mostró una correlación inferior a 0.4 respecto a la cronología media. El período total de las cronologías obtenidas se extiende desde 1959 a 2011 (52 años) en los árboles adultos y desde 1994 a 2011 en los árboles jóvenes (18 años).

De acuerdo con los estadísticos descriptivos (Tabla 1) la sensibilidad media (MS) de las cronologías fue de 0,296 y 0,278 para árboles adultos y jóvenes, y la EPS fue superior a 0,93 en ambos casos, esto indica un alto nivel de variabilidad compartida en cada cronología controlada por factores climáticos. Adicionalmente, se observó una gran diferencia en los valores de autocorrelación previa a la estandarización entre las dos masas, por un lado un valor relativamente alto de AC 0,51 en árboles adultos, lo que significa que el crecimiento de un año determinado está parcialmente explicado

por el crecimiento del año previo, mientras que en los árboles jóvenes esta relación fue mucho menor 0,34 de AC.

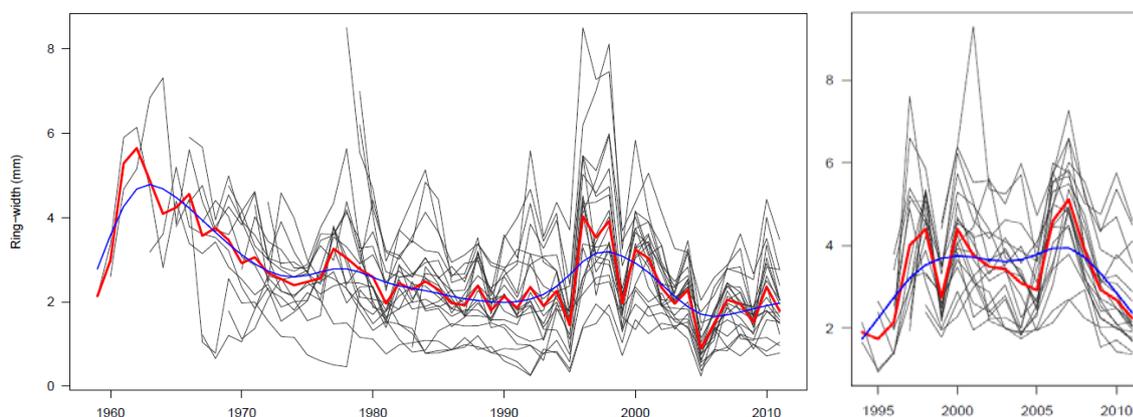


Figura. 3. Series de anillos de crecimiento individuales (líneas negras) y cronología maestra (línea roja) de *P. pinaster* de los árboles adultos (izquierda) y árboles jóvenes (derecha). La línea azul representa la spline suavizada utilizada en la estandarización.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las cronologías de ancho de anillos y cronologías residuales de masas adultas y jóvenes de *P. pinaster*.

	Adultos	Jóvenes
Intervalo	1959 - 2011	1994 - 2011
Nº árboles (cores)	10 (20)	10 (19)
Ancho medio de anillos (mm)	2,512	3,583
Desviación estándar SD	1,087	1,223
Sensibilidad media MS	0,295	0,277
Autocorrelación de primer orden	0,510	0,338
r	0,681	0,576
<i>Cronologías residuales</i>		
EPS	0,972	0,965
r _{bt}	0,582	0,554

r: correlación media de las series con la cronología maestra; EPS: señal expresada por la población; r_{bt}: correlación media entre árboles.

Patrones de crecimiento.

En la cronología de ancho de anillo e índices de crecimiento de los árboles adultos (Fig. 4a, b) se observó un incremento de la variabilidad interanual a partir de las año

1995 en comparación con décadas pasadas, además los índices de crecimiento más extremos se presentaron en este período. Al comparar las cronologías de ancho de anillo e índices crecimiento de los dos grupos de edad, visualmente se apreció un patrón similar en ciertos años, sin embargo para el período común de crecimiento de ambas series (1994 – 2011) tanto las cronologías de ancho de anillos como los índices de crecimiento estuvieron débilmente correlacionadas (r 0,219 – 0,277). El ancho medio de los anillos en la cronología de árboles adultos (2,37 mm) fue significativamente menor (t -3,1753, df 33,9, p 0,003182) a la de los árboles jóvenes (3,58mm) para el mismo período.

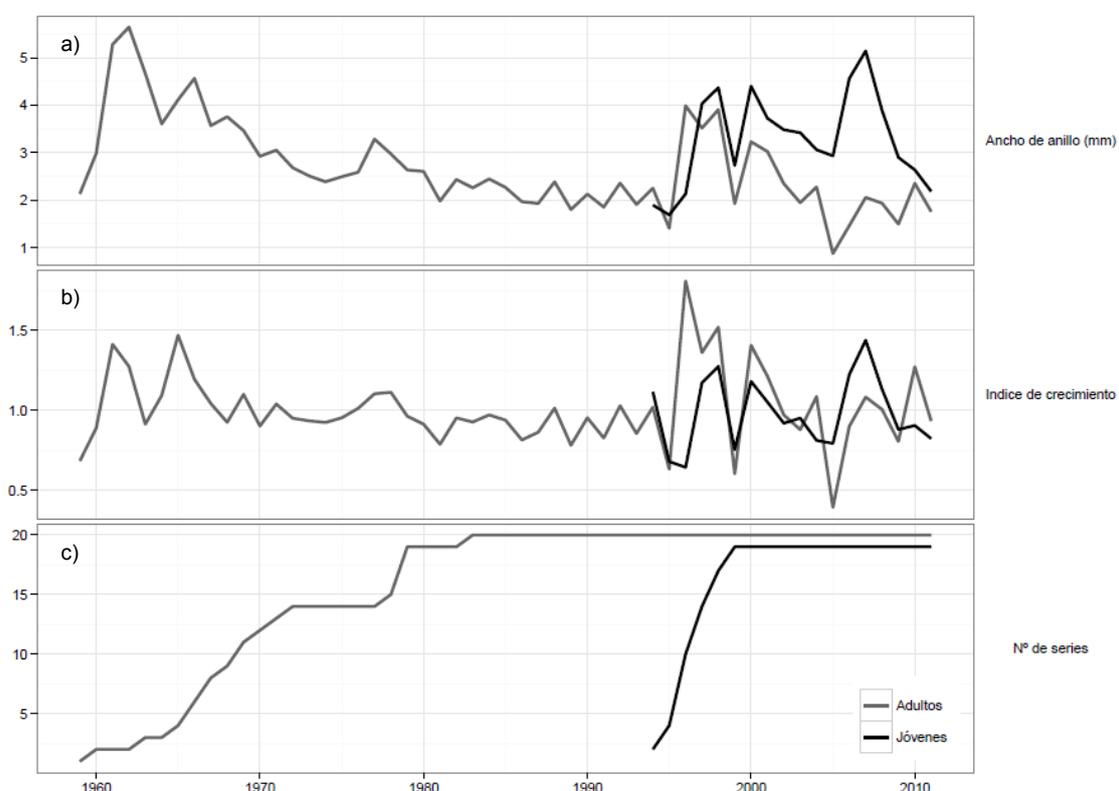


Figura. 4. **a)** Cronologías medias de ancho de anillos, **b)** Índices de crecimiento y **c)** Número de series en cada cronología de árboles adultos (línea gris) y árboles jóvenes (línea negra) de *P. pinaster*.

Por otro lado, para comprobar si a la misma edad las dos masas tuvieron patrones similares en el crecimiento inicial, considerando el clima actual y el de hace 40 años, las cronologías de ancho de anillo e índices crecimiento se sincronizaron a la edad común biológica estimada y mitad de los adultos y jóvenes (Fig 5a, b). Para el período de edad común (18 años) se observó que aunque el crecimiento en los primeros años de los árboles adultos fue mayor que el de los jóvenes, no se

encontraron diferencias significativas entre el ancho medio de los anillos (t 0,1429, df 33,366, p 0,8872) entre árboles adultos (3,39mm) y jóvenes (3,60mm) y las dos series estuvieron altamente correlacionadas (r 0,641) como efecto de un patrón ontogénico similar de crecimiento, sin embargo los índices de crecimiento de las dos masas presentaron una baja correlación (r 0,181) signo de las diferentes condiciones climáticas en las que se desarrollaron los grupos de edad.

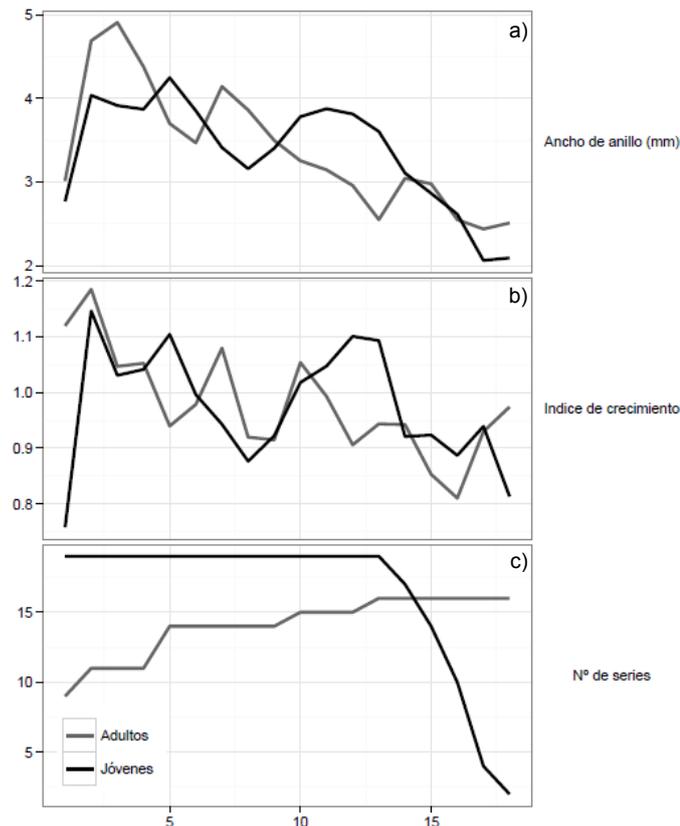


Figura. 5. a) Cronologías medias de ancho de anillos, b) Índices de crecimiento y c) Número de series en cada cronología de árboles adultos (línea gris) y árboles jóvenes (línea negra) de *P. pinaster* a una edad común.

Sensibilidad climática

La relación entre el error estándar y el índice de crecimiento de las cronologías de ambos grupos (Fig. 6) mostró que los años con altos índices de crecimiento también presentaron mayor error estándar que los años con bajo índice promedio. Esta relación se puede interpretar como una respuesta similar del crecimiento entre los dos grupos de edad a los factores macroclimáticos de la zona de estudio, ya que los años con condiciones climáticas más severas que formaron anillos más estrechos, el ancho

de anillo varía poco entre árboles lo que indica una respuesta general al factor clima; lo contrario ocurre con los años más favorables para el crecimiento que presentan una mayor variabilidad entre árboles en ambos grupos.

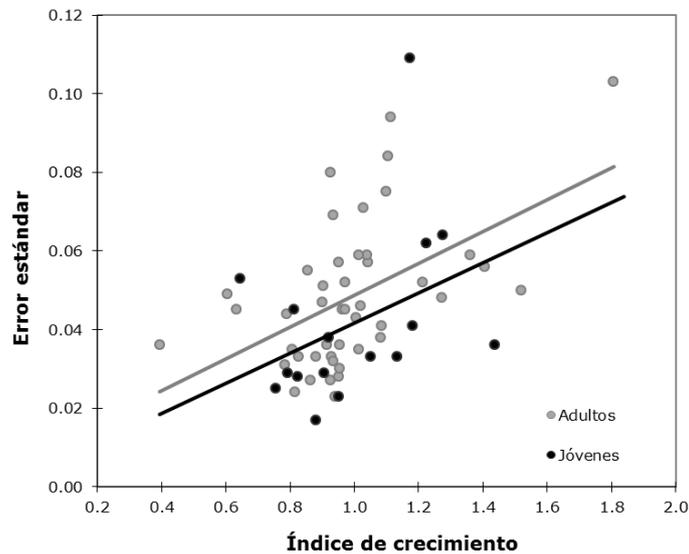


Figura. 6. Error estándar de los valores anuales del índice de crecimiento de masas jóvenes (líneas y puntos negros) y adultas (líneas y puntos grises) de *P. pinaster*.

Relación entre clima y crecimiento

Los datos de variables climáticas agrupados por estaciones se contrastaron con los índices de crecimiento (cronología residual) de los dos grupos de edad, las correlaciones y función de respuesta se calcularon mediante correlaciones derivadas de *bootstrap* con 1000 réplicas para el período 1959-1976 de los árboles adultos y 1994-2011 de ambos grupos de edad.

En general se observó una respuesta común de los árboles adultos y jóvenes a las variables de temperatura y precipitación estacional durante el período común de crecimiento (1994-2007) (Fig. 7), sin embargo las respuestas no fueron igualmente significativas en ambos grupos. Mientras las precipitaciones de verano y otoño del año previo y las de primavera de la estación de crecimiento se correlacionan positivamente con el crecimiento de los árboles jóvenes, los árboles adultos sólo se correlacionan positivamente con las precipitaciones de invierno. Respecto a las temperaturas, la primavera y verano del año de crecimiento tuvieron una correlación negativa, mientras

que en invierno fue positiva para los árboles adultos, en cambio los árboles jóvenes no mostraron ninguna correlación significativa con la temperatura estacional.

Correlaciones muy diferentes se obtuvieron para los árboles adultos en el período inicial de crecimiento (1959-1976), encontrándose en este caso relaciones significativas con precipitaciones de verano y otoño del año de crecimiento y las temperaturas de primavera y verano del año previo. Esto parece indicar que independientemente del período, los árboles jóvenes responden de manera distinta en términos de significación al clima que los árboles adultos.

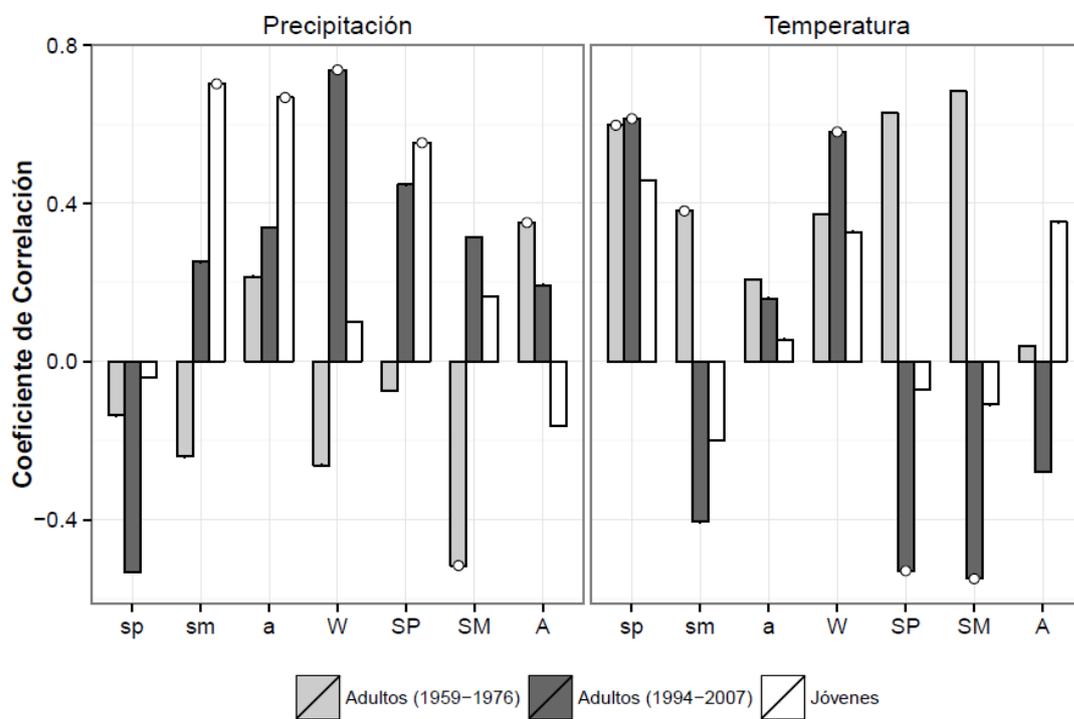


Figura. 7. Coeficientes de correlación entre cronologías residuales de árboles jóvenes y adultos con valores estacionales de precipitación y temperatura (barras blancas árboles jóvenes, barras gris claro árboles adultos 1959-1976, barras gris oscuro árboles adultos 1994-2007). Letras minúsculas indican el año previo y letras mayúsculas el año de crecimiento. Las correlaciones significativas se representan con círculos blancos ($p < 0,05$).

Por otra parte, las correlaciones obtenidas con el índice de aridez mostraron una tendencia similar a las observadas con la precipitación. Los árboles jóvenes solamente presentaron una correlación significativamente positiva con el DRI de otoño del año

previo, mientras que en correlaciones dispares se observaron en los árboles adultos en los dos períodos analizados (Fig 8).

Los coeficientes significativos de la función de respuesta para DRI se obtuvieron en invierno y primavera del año de crecimiento en los árboles adultos entre 1994-2007, mientras para el período de crecimiento inicial de este grupo los valores de DRI en verano del año de crecimiento presentaron una relación negativamente significativa, además en los árboles jóvenes no se observó ninguna relación significativa.

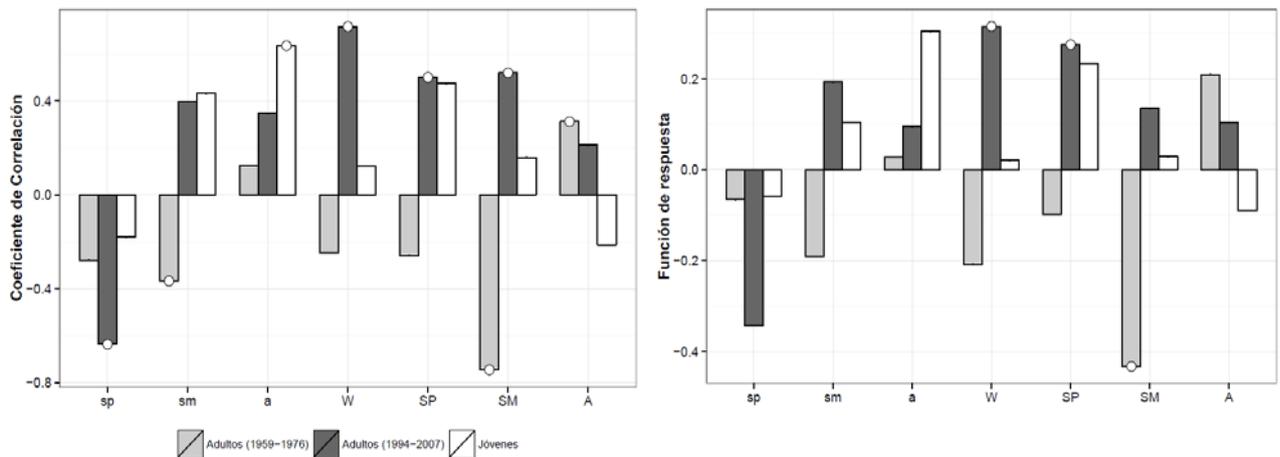


Figura. 8. Coeficientes de correlación (a) y función de respuesta (b) entre cronologías residuales de árboles jóvenes y adultos con valores de DRI (barras blancas *árboles jóvenes*, barras gris claro *árboles adultos 1959-1976*, barras gris oscuro *árboles adultos 1994-2007*). Letras minúsculas indican el año previo y letras mayúsculas el año de crecimiento. Las relaciones significativas se representan con círculos blancos ($p < 0,05$).

Análisis dinámico de las respuestas al clima

En el análisis de la variación de respuestas al clima se apreció un cambio en los patrones de respuesta a lo largo del tiempo a partir de mediados de la década del 90 (Fig. 9), por un lado se observó un incremento en la significación de las respuestas positivas a DRI de otoño previo, invierno y primavera del año de crecimiento, y un decrecimiento de la respuesta al DRI de verano del año previo y del año de crecimiento. Adicionalmente, en este período se detectó un cambio en la significación de las variables de acuerdo a la tendencia de la serie. La relación con DRI de invierno fue significativa y positiva para todo el período de crecimiento.

En general, se observó mayor respuesta a las variables climáticas que están relacionadas con el inicio del período anual de crecimiento, y menor relación o decreciente con las del final de la estación de crecimiento.

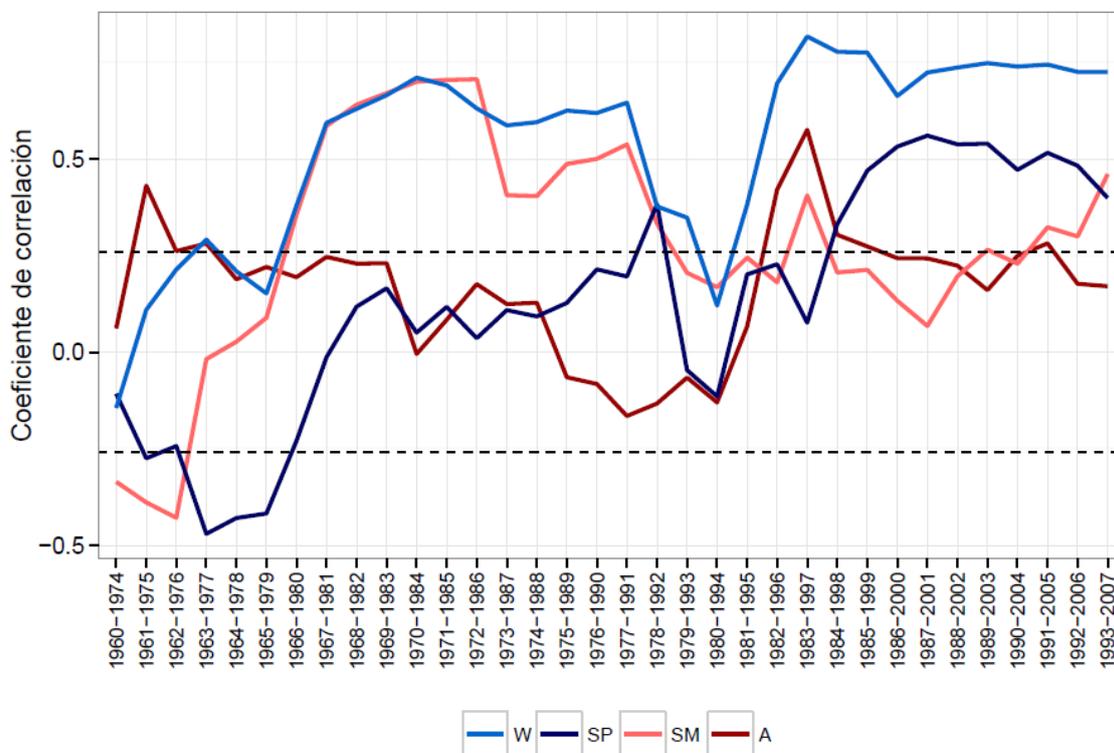


Figura. 9. Correlaciones temporales del crecimiento al DRI calculadas en ventanas móviles de 14 años. Se representan las series estacionales que fueron significativas para el período 1994-2007 de los árboles adultos. Las líneas entrecortadas indican los límites a partir de los cuales las correlaciones son significativas.

Discusión

En nuestros resultados las cronologías de ambos grupos de edad de *P. pinaster*, presentaron altos valores de MS y EPS, lo que indica una respuesta fiable general de los patrones de crecimiento a factores ambientales (Speer, 2010; Cook & Pederson, 2011), esto muestra que a pesar del corto período de análisis dendroclimático los individuos tuvieron la suficiente sensibilidad a las variables climáticas para manifestar respuestas en sus patrones de crecimiento, valores similares a los estadísticos de las cronologías se han reportado en estudios previos de *P. pinaster* en la península ibérica (Bogino & Bravo, 2008; Vieira et al., 2010; Campelo et al., 2012), por lo que se

respalda el uso de esta especie para estudios dendrocronológicos, incluso en individuos jóvenes.

La relación positiva entre el índice de crecimiento y el error estándar (Fig 5) mostró que ambos grupos de edad tuvieron una respuesta diferenciada frente a las condiciones climáticas, formando anillos estrechos en aquellos años con condiciones climáticas desfavorables, esto significa que las cronologías expresan una señal común en individuos de diferentes edades y que comparten una variabilidad en el crecimiento que se puede interpretar como una respuesta común a factores macroclimáticos (Tardif et al., 2003), más aún durante eventos extremos de sequía donde se ha observado una mayor reducción del crecimiento radial en *P. pinaster* en la región sur de España (Sánchez-Salguero et al., 2010). En cambio bajo condiciones climáticas favorables se observó un considerable aumento de la variabilidad del ancho de anillo entre individuos, posiblemente debido a que en estas circunstancias los factores que determinan de desarrollo de los individuos (tipo de crecimiento, vigor, tamaño) o su condición dentro del rodal (competencia, clase social) acrecentaron las diferencias de crecimiento entre individuos de la misma edad (Fritts, 1976; Vaganov et al., 2011).

El incremento de la variabilidad de crecimiento radial en las últimas décadas también se ha observado en *P. pinaster* por Bogino & Bravo (2009) en España y Vieira et al. (2010) en Portugal en relación con cambios en la frecuencia de variaciones interanuales de densidad (FIADs) e incremento de la frecuencia de anillos estrechos en otros pinos mediterráneos (Andreu et al., 2007). Estos cambios son evidencias del efecto del cambio climático sobre el crecimiento de los bosques, no sólo en la reducción del crecimiento sino también en el incremento de la variabilidad interanual y sensibilidad media a las condiciones climáticas sobre todo en los árboles adultos.

La débil correlación encontrada entre las cronologías residuales de árboles jóvenes y adultos en el período de igual edad mostró que estas relaciones están controladas por las condiciones climáticas durante los respectivos períodos de crecimiento. De la misma forma la correlación y función de respuesta claramente mostraron una dependencia de la edad y período de análisis, lo que indica una relación cambiante con el clima a través del tiempo, este comportamiento también concuerda con otros estudios de *P. pinaster* (Vieira et al., 2008), otras especies y ámbitos geográficos (Carrer & Urbinati, 2004; Yu et al., 2008; Rozas et al., 2009; Linares et al., 2012) que han reportado cambios sistemáticos en el crecimiento y respuestas climáticas relacionadas con la edad de los individuos, donde los árboles más adultos mostraron

una relación y sensibilidad más fuerte con el clima, aunque otros estudios han registrado diferencias no significativas en la relación clima-crecimiento entre grupos de edad (Esper et al., 2008; Dorado Liñán et al., 2011).

En general las cronologías residuales de los árboles adultos fueron más sensibles a la influencia climática que la de los árboles jóvenes durante el período común de crecimiento, similar a lo encontrado por Vieira et al. (2008) y Martínez-Vilalta et al. (2012) para *P. pinaster* y *P. sylvestris* respectivamente. Además la precipitación y el índice de aridez se manifestaron como las variables climáticas más determinantes sobre el crecimiento y mostraron tendencias similares, aunque con distintos niveles de significación, mientras que el efecto de la temperatura solo se destacó en los árboles adultos, sobre todo durante el período de mayor actividad del cambium en los pinos mediterráneos que ocurre entre abril y junio (Camarero et al., 2010).

P. pinaster como otras especies en la región mediterránea es vulnerable a los períodos de sequía (Sánchez-Salguero et al., 2010), cuyos efectos dependen de la intensidad y recurrencia de los eventos produciendo en general una drástica reducción en el incremento del área basimétrica e incluso altos niveles de defoliación (Pichler & Oberhuber, 2007; Martín-Benito et al., 2008). Se ha observado que cuando la disminución de la disponibilidad de agua ocurre durante el mayor período de actividad cambial y crecimiento puede originar fenómenos de decaimiento y mortalidad (Hereş et al., 2011; Sánchez-Salguero et al., 2012). Con nuestros resultados se observó que los efectos de la sequía sobre el crecimiento también son dependientes de la edad, y al parecer a medida que aumenta la edad de los árboles los eventos de sequía previos y en el inicio de la estación de crecimiento se tornan más relevantes.

Esta mayor sensibilidad de árboles adultos se evidenció durante los períodos de sequía intensa registrados en nuestro rango de análisis (1999 y 2005), donde el crecimiento de los árboles adultos fue menor que en los jóvenes, en cambio cuando se registraron años con alta disponibilidad hídrica su crecimiento se aceleró rápidamente (Fig. 4b), esto se puede interpretar como un comportamiento oportunista relacionado con la edad (Rozas et al., 2009) lo que indica mayor plasticidad de los árboles adultos a las condiciones hídricas, este comportamiento post-sequía ha sido observado entre árboles de diferentes tamaño y edad en otras especies de pinos en España (Martín-Benito et al., 2008; Martínez-Vilalta et al., 2012).

Estas diferencias tanto en la sensibilidad climática como en el crecimiento entre árboles jóvenes y adultos se pueden explicar por diferencias fisiológicas que responden a la edad de los individuos. Por un lado el período anual de crecimiento en las coníferas adultas se inicia más tarde y termina antes que en los individuos más jóvenes (Rossi et al., 2008). Además la eficiencia de translocación de agua a través del árbol disminuye conforme aumenta en edad o altura (Delzon & Loustau, 2005; Ryan et al., 2006), esto también ha sido argumentado por Carrer & Urbinati (2004) y Rozas et al. (2009) para explicar la mayor sensibilidad climática en coníferas de mayor edad.

Los cambios en la sensibilidad al clima durante los últimos años ha sido descrita por varios autores para *P. pinaster* y otras especies de pinos mediterráneos (Andreu et al., 2007; Bogino et al., 2009b; Olivar et al., 2012) y permiten investigar cambios en la respuesta de las masas forestales a los factores climáticos que condicionan su productividad. En nuestro caso, con ninguna de las tres variables climáticas analizadas se pudo simplificar una respuesta homogénea cuando se compararon los árboles adultos en diferentes períodos, ya que la asociación entre crecimiento y las variables climáticas cambió de acuerdo con al momento de análisis (Fig. 7 y 8), estos cambios se observaron en el nivel de significación y signo de las correlaciones. La relación con DRI reflejó un incremento general en la respuesta especialmente previo y en el inicio de la estación de crecimiento (W y SP) a medida que aumenta la edad, sin embargo también se apreciaron oscilaciones de las correlaciones durante todo el período analizado, esto indica que el clima podría haberse convertido en el factor más limitante para el crecimiento por el aumento del estrés hídrico y debido a la variabilidad de las precipitaciones que se ha registrado durante la segunda mitad del siglo XX (De Luis et al., 2009), ya que estos cambios aparecen vinculados a cambios en los patrones de crecimiento de los árboles.

Conclusiones

Se construyeron cronologías de *Pinus pinaster* que representan dos grupos de edad para la provincia de Ciudad Real y se identificaron cambios en las relaciones clima-crecimiento entre grupos de edad y período de análisis.

Las relaciones del clima con el crecimiento en *P. pinaster* son parcialmente controladas por la edad, ya que presentaron alta sensibilidad al período de análisis maximizando la señal climática en los árboles adultos. Estas relaciones fueron altamente sensibles a las fluctuaciones de las condiciones de disponibilidad hídrica previa y en el inicio de la estación de crecimiento, tornándose mucho más fuertes a medida que aumenta la edad de los árboles. El incremento de la sensibilidad media de los árboles adultos produce un mayor impacto y capacidad de reacción durante eventos de sequía y post-sequía respectivamente, esta sensibilidad podría aumentar si se incrementan la frecuencia e intensidad de las condiciones de sequía.

Durante la edad común de crecimiento la variabilidad interanual de ancho de anillo tuvo mayor dependencia de las condiciones climáticas durante el período de crecimiento que de la edad de los individuos, este cambio en la relación de los patrones de crecimiento con la respuesta climática no es uniforme en el tiempo y revela una variación en la actividad cambial, que puede afectar significativamente la dinámica de los bosques mediterráneos, ya que tanto el aumento del estrés hídrico como el incremento de la variabilidad de las precipitaciones se ha previsto para las próximas décadas.

Debido a que estos resultados se refieren a un área geográfica limitada y a un conjunto de datos relativamente pequeño, deben considerarse como un indicio para estudios más amplios que consideren diferentes regiones y especies, a fin de encontrar respuestas más generales que se incluyan en futuras evaluaciones de impacto de cambio climático sobre la dinámica de sistemas forestales. Además para las reconstrucciones climáticas basadas en cronologías de anchos de anillos debería considerarse la falta de estabilidad temporal en algunas relaciones clima-crecimiento, que podría incorporar desviación y sesgo en las estimaciones.

Bibliografía

- ANDREU, L.; GUTIÉRREZ, E.; MACÍAS, M.; RIBAS, M.; BOSCH, O.; CAMARERO, J. J.; MACÍAS, M. 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology* 13.
- BIONDI, F. 2000. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, USA? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 32:111–116.
- BIONDI, F.; WAIKUL, K. 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30:303–311.
- BOGINO, S.; BRAVO, F. 2008. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Annals of Forest Science* 65.
- BOGINO, S.; BRAVO, F. 2009. Climate and intraannual density fluctuations in *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* in Spanish woodlands. *Canadian Journal of Forest Research* 39:1557–1565.
- BOGINO, S.; BRAVO, F.; FERNÁNDEZ - NIETO, M. J. 2009a. Clima y crecimiento forestal en ambientes mediterráneos: *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris* en España. 5CFE01–014:1–9 en S.E.C.F. (ed.). *Actas 5º Congreso Forestal Español*. . Sociedad Española de Ciencias Forestales, Ávila.
- BOGINO, S.; FERNÁNDEZ NIETO, M.; BRAVO, F. 2009b. Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* at its southern and western distribution limits. *Silva Fennica* 43:609–623.
- BOND, B. J. 2000. Age-related changes in photosynthesis of woody plants. *Trends in plant science* 5:349–53.
- BUNN, A. G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26:115–124.
- CAMARERO, J. J.; LLORET, F.; CORCUERA, L.; PEÑUELAS, J.; GIL-PELEGRÍN, E. 2004. Cambio global y decaimiento del bosque. 397–423 en F. Valladares, (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- CAMARERO, J. J.; OLANO, J. M.; PARRAS, A. 2010. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *The New phytologist* 185:471–80.
- CAMPELO, F.; VIEIRA, J.; NABAIS, C. 2012. Tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* responses to climate: does size matter? *Trees* 27:763-772.
- CARRER, M.; URBINATI, C. 2004. Age-Dependent Tree-Ring Growth Responses to Climate in *Larix Decidua* and *Pinus Cembra*. *Ecology* 85:730–740.

- COOK, E. R. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. . University of Arizona.
- COOK, E. R.; PEDERSON, N. 2011. Uncertainty, Emergence, and Statistics in Dendrochronology. 77–112 en M. K. Hughes, T. W. Swetnam, and H. F. Diaz, (eds.). Dendroclimatology. Springer Netherlands, Dordrecht.
- D'ARRIGO, R.; WILSON, R.; LIEPERT, B.; CHERUBINI, P. 2008. On the “Divergence Problem” in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change* 60:289–305.
- DAY, M. E.; GREENWOOD, M. S.; DIAZ-SALA, C. 2002. Age- and size-related trends in woody plant shoot development: regulatory pathways and evidence for genetic control. *Tree physiology* 22:507–13.
- DELZON, S.; LOUSTAU, D. 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology* 129:105–119.
- DORADO LIÑÁN, I.; GUTIÉRREZ, E.; HEINRICH, I.; ANDREU-HAYLES, L.; MUNTÁN, E.; CAMPELO, F.; HELLE, G. 2011. Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old-growth life stages. *European Journal of Forest Research* 131:933–944.
- ESPER, J.; NIEDERER, R.; BEBI, P.; FRANK, D. 2008. Climate signal age effects—Evidence from young and old trees in the Swiss Engadin. *Forest Ecology and Management* 255:3783–3789.
- FRITTS, H. C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Page 567. The Blackburn Press.
- GRISSINO-MAYER, H. 2001. Research report evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research* 57:205–221.
- GUIOT, J. 1991. The bootstrapped response function. *Tree-ring bulletin* 51:39–41.
- HELAMA, S.; LINDHOLM, M.; TIMONEN, M.; ERONEN, M. 2004. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods. *Theoretical and Applied Climatology* 79:239–254.
- HEREŞ, A.-M.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; CLARAMUNT LÓPEZ, B. 2011. Growth patterns in relation to drought-induced mortality at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in NE Iberian Peninsula. *Trees* 26:621–630.
- HERRERA, S.; GUTIÉRREZ, J. M.; ANCELL, R.; PONS, M. R.; FRÍAS, M. D.; FERNÁNDEZ, J. 2012. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology* 32:74–85.
- HUGHES, M. K. 2002. Dendrochronology in climatology – the state of the art. *Dendrochronologia* 20:95–116.

- LINARES, J. C.; CAMARERO, J. J.; CARREIRA, J. A. 2009. Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography* 18:485–497.
- LINARES, J. C.; TAÏQUI, L.; SANGÜESA-BARREDA, G.; SECO, J. I.; CAMARERO, J. J. 2012. Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia* 31:88–96.
- LINDERHOLM, H. W.; LINDERHOLM, K. 2004. Age-dependent climate sensitivity of *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains. *Boreal environment research* 9:307–317.
- DE LUIS, M.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; LONGARES, L. A.; SOTEPÁNEK, P. 2009. Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20th century. *International Journal of Climatology* 29:1312–1323.
- MALIVA, R.; MISSIMER, T. 2012. Aridity and Drought. Pages 21–39 en R. Maliva and T. Missimer (eds.) *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- MARTÍN-BENITO, D.; CHERUBINI, P.; RÍO, M.; CAÑELLAS, I. 2008. Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees* 22:363–373.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LÓPEZ, B. C.; LOEPFE, L.; LLORET, F. 2012. Stand- and tree-level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. *Oecologia* 168:877–88.
- OLIVAR, J.; BOGINO, S.; RATHGEBER, C. B. K.; ORDOÑEZ ALONSO, C.; LEPORATI, J.; BRAVO, F. 2013. Efecto de distintas intensidades de clara en el crecimiento secundario del pino carrasco (*Pinus halepensis*) y análisis de la influencia de las variables climáticas a escala inter e intra-anual. 6CFE01–002:14 en G. Montero González and M. Guijarro Guzmán, (eds) *Actas 6º Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Pontevedra.
- OLIVAR, J.; BOGINO, S.; SPIECKER, H.; BRAVO, F. 2012. Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Dendrochronologia* 30:35–47.
- PICHLER, P.; OBERHUBER, W. 2007. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management* 242:688–699.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2010. R: A language and environment for statistical computing.
- RICHTER, K.; ECKSTEIN, D.; HOLMES, R. . 1991. The dendrochronological signal of pine trees in (*Pinus* spp.) Spain. *Tree-ring Bulletin* 51:1–13.
- RODRÍGUEZ, J. R.; SERRADA, R.; LUCAS, J. A.; REYES, A.; DEL RÍO, M.; TORRES, E.; CANTERO AMIANO, A. 2008. Selvicultura de *Pinus pinaster* Ait. subsp. *mesogeensis* Fieschi & Gausen. 399–430 en R. Serrada, G. Montero, and J. A. Reque, (eds.) *Compendio de Selvicultura Aplicada en España*. Instituto Nacional

de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Ministerio de Educación y Ciencia., Madrid.

- ROSSI, S.; DESLAURIERS, A.; ANFODILLO, T.; CARRER, M. 2008. Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *The New phytologist* 177:199–208.
- ROZAS, V. 2003. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*. testing previous and improved methods. *Plant Ecology* 167:193–212.
- ROZAS, V.; DESOTO, L.; OLANO, J. M. 2009. Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus thurifera*. *The New phytologist* 182:687–97.
- RYAN, M. G.; PHILLIPS, N.; BOND, B. J. 2006. The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell and Environment* 29:367–381.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C.; SÁNCHEZ, A. 2002. Likely effects of Climate Change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean Region. *Forest Ecology and Management* 162:23–37.
- SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; NAVARRO-CERRILLO, R.; CAMARERO, J. J.; FERNÁNDEZ-CANCIO, A. 2010. Drought-induced growth decline of Aleppo and maritime pine forests in south-eastern Spain. *Forest Systems* 19:458–469.
- SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CAMARERO, J. J.; FERNÁNDEZ-CANCIO, Á. 2012. Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain. *Climatic Change* 113:767–785.
- SCHWEINGRUBER, F. H. 1993. Trees and wood in dendrochronology: morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. Springer.
- SPEER, J. H. 2010. Fundamentals of Tree-Ring Research. Page 333. . University of Arizona Press, Tucson.
- TARDIF, J.; CAMARERO, J. J.; RIBAS, M.; GUTIÉRREZ, E. 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees: Climatic and site influences. *Ecological Monographs* 73:241–257.
- THORNTON, C. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38:55–94.
- VAGANOV, E. A.; ANCHUKAITIS, K. J.; EVANS, M. N. 2011. How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics. 37–75 *en* M. K. Hughes, T. W. Swetnam, and H. F. Diaz, (eds). *Dendroclimatology*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- VIEIRA, J.; CAMPELO, F.; NABAIS, C. 2008. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. *Trees* 23:257–265.

- VIEIRA, J.; CAMPELO, F.; NABAIS, C. 2010. Intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* are a record of climatic changes in the western Mediterranean region. *Canadian Journal of Forest Research* 40:1567–1575.
- VIGUERA MORENO, B. 2012. Análisis dendroecológico de las tendencias de crecimiento de árboles muertos y su aplicabilidad para la detección del declive de masas forestales como respuesta al. Trabajo fin de Máster. Universidad de Valladolid.
- WANG, H.; SHAO, X.; JIANG, Y.; FANG, X.; WU, S. 2013. The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China. *Forest Ecology and Management* 289:333–340.
- YU, G.; LIU, Y.; WANG, X.; MA, K. 2008. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Qilian juniper* (*Sabina przewalskii* Kom.). *Trees* 22:197–204.
- ZANG, C.; BIONDI, F. 2013. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* 31:68–74.

Anexo 1. Anexo fotográfico

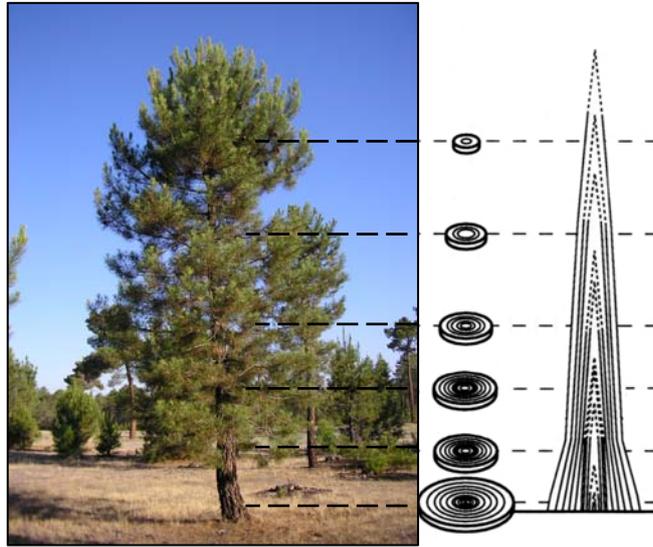


Foto 1. Puntos de muestreo. Rodajas en árboles jóvenes y canutillos en árboles adultos. (base, altura normal, base de la copa, punta delgada 7 cm, puntos medios comprendidos entre la altura normal y base de la copa, y entre la base de la copa y altura en punta delgada).



Foto 2. Procesamiento de muestras.- secado, montaje sobre soportes de madera, prensado, lijado

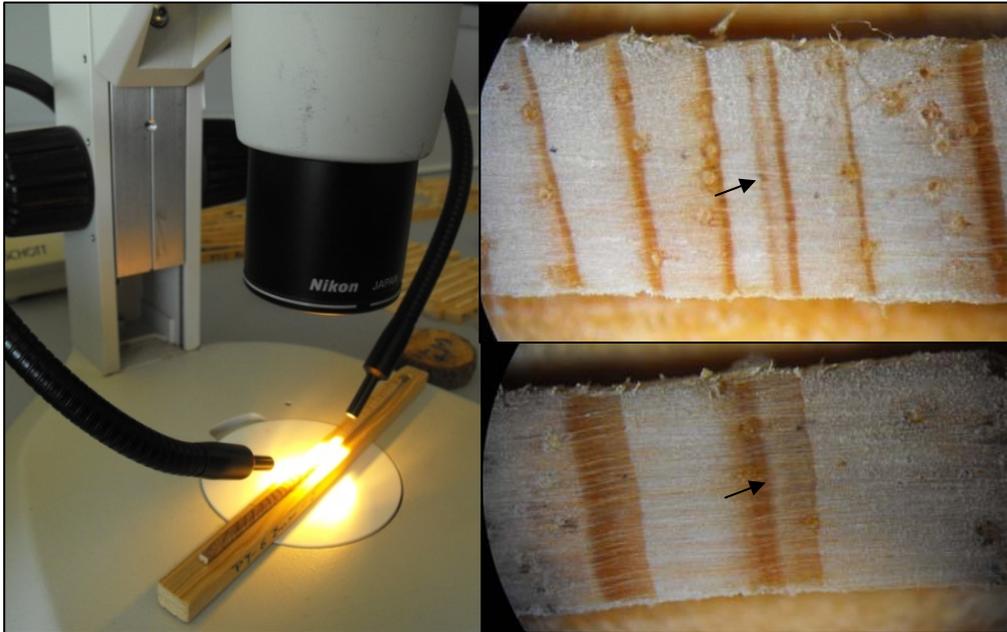


Foto 3. Datación de muestras e identificación falsos anillos

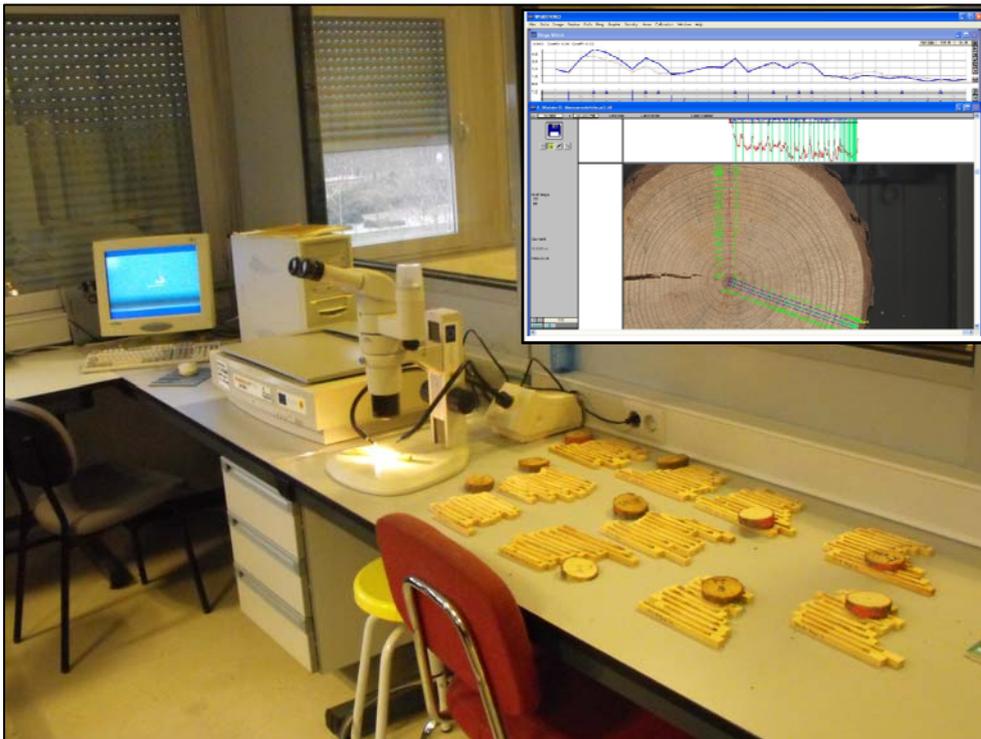


Foto 4. Escaneo de muestras y análisis con el software Windendro®.

Anexo 2. Análisis estadístico

1. Estandarización de series

```
#Bunn (2008). Dendrochronology Program Library in R

library<-(dplR)

#definir directorio de trabajo
  setwd("~/ / /R/DENDRO")
  dir()

# abrir archivo de datos en formato Tucson
  POD<-read.tucson("PoD.txt",header=NULL,long = FALSE)
# definir la nomenclatura de las muestras; sitio, árbol, core
  read.ids(POD, stc = c(3, 2, 1))
# calcula los estadísticos descriptivos de las series (media,
MS, SD, AC)
  POD.stats <- rwl.stats(POD)
#valores medios, min y max de las series
  POD.stats.mean<-mean(POD.stats[,c(4:12)])
  POD.maxED<-c(min(POD.stats[,2]), max(POD.stats[,3]),
              max(POD.stats[,4]), min(POD.stats[,4]))
#gráfico conjunto de series
  spag.plot(POD, zfac = 2)
#DETRENDING
# rigidez de la función spline, nyrs= n° años
# gráfico de cada serie, make.plot= T
  POD.rwi<-detrend(POD,method="Spline",make.plot = TRUE,
                 nyrs=60)
# Obtener estadísticos después del detrending (rbar, EPS)
  rwi.stats(POD.rwi,ids=POD.ids)

#Cronología media de las series
# regresión doblemente ponderada, biweight = TRUE
# modelo autoregresivo para corregir autocorrelación,
#prewhiten = TRUE
  POD.crn<-chron(POD.rwi, prefix="POD",biweight = TRUE,
                prewhiten = TRUE)
POD.rwi.stats<- rwi.stats(POD.rwi,ids=POD.ids)
#Gráfico de la cronología
  crn.plot(POD.crn, add.spline=TRUE, nyrs=60)
  POD.crn

#Comparación de media y correlación entre series, para datos
#pareados en el mismo periodo de crecimiento.
  O.TRW<-POD
  O.TRW$year<-row.names(POD)
  O.TRW<-melt(O.TRW,
             id.vars=c("year"),
             measure.vars=c("DBH01a",...#series de ancho de anillo),
             variable.name="arbol", value.name="TRW")
```

```

#calcula la media de ancho de anillo por año, excluye NA's
O.TRW <- ddply(O.TRW, .(year), summarise,
  N = sum(!is.na(value)),
  mean = mean(value,na.rm=TRUE))
OD<-cbind(POD.crn,O.TRW)
OD<-subset(OD,year>1993)

#"YD" medias y residuales de árboles jóvenes.
t.test(OD$TRW,y=YD$TRW)
t.test(OD$PODstd,y=YD$PYDstd)
t.test(OD$PODres,y=YD$PYDres)
cor.test(OD$TRW, YD$TRW)
cor.test(OD$PODres, YD$res)
plot(OD$TRW,y=YD$TRW)
plot(OD$PODres, YD$PYDres)

```

2. Análisis dendroclimático

#Zang & Biondi(2013). Bootstrapped response and correlation functions

```
library<-(bootRes)
```

```

#extraer las cronologías residuales de las series estandarizadas
POD.r<-POD.crn [,2:3]# residual index and deph sample
POD.res<-POD.r[complete.cases(POD.r),]#eliminar las filas
#con NA's

```

```

# cargar los datos de clima
BIO.P<-read.table("BIO.P.txt", header=TRUE)
BIO.T<-read.table("BIO.T.txt", header= TRUE)
DRI<-read.table("DRI.txt", header= TRUE)

```

```

# Función de correlación y respuesta
# variables climáticas, list ( , )
# f respuesta, method="resp". F correlación, method="corr"
# intervalo de análisis, start= mes de inicio, end= último
# mes. Valores negativos corresponden a año previo
# ci, establece el nivel de significación del análisis
POD.corrS.bio<-dcc(POD.res, list(BIO.P, BIO.T),
  vnames = c("PP", "Tm"),method="corr",
  start=-10,end=9, ci=0.05)
# Gráfico de correlaciones y función de respuesta
# barras gris oscuro corresponden a variables significativas
dcplot(POD.corrS.bio,ci=F)

```

```

# Función de correlación y respuesta en ventanas móviles
# tamaño de la ventana de análisis, win.size=nº de años
POD.corrD.bio <- mdcc(POD.res,list(BIO.P,BIO.T),
  vnames=c("PP", "Tm"),method="corr",
  win.size=29,start=-10, end=9)
mdcplot(POD.corrD.bio)

```