

El crecimiento de *Abies pinsapo* y el clima de Grazalema: aportaciones dendroecológicas

M. Génova Fuster

EUIT Forestal. UPM. Avda. Ramiro de Maeztu, s/n. 28040 Madrid. España

Resumen

Abies pinsapo es una interesante especie que habita en condiciones ecológicas especiales, bajo un subtipo particular muy lluvioso del clima mediterráneo, aunque árido en verano. Se ha estudiado el crecimiento radial por métodos dendrocronológicos en dos poblaciones ibéricas y se han analizado, tanto las tendencias generales, como las oscilaciones particulares y los años característicos de las series obtenidas. Se han elaborado tres cronologías locales, en función de la localización y de la edad de los árboles, la más larga se extiende desde 1690 a 1998. La señal climática contenida en estas cronologías se ha determinado utilizando el registro meteorológico de Grazalema, el más completo y extenso entre los próximos a pinsapares. Se han señalado los efectos de la extrema sequía sucedida en el quinquenio 1990-1995 y se sugieren medidas que puedan mitigarlos si se reprodujera dicha situación en el futuro.

Palabras clave: Pinsapo, España, anillos de crecimiento, dendroecología, aridez.

Abstract

The growth of *Abies pinsapo* and the climate of Grazalema: dendroecological approach

Abies pinsapo is an interesting species which lives in special ecological conditions, in a particular very rainy subtype of Mediterranean climate, which nevertheless is arid in summer. Its radial growth has been studied using dendrochronological methods in two Iberian populations, and both the general trends and the particular disturbances have been analysed, together with the pointer years of the tree rings series. Three local chronologies have been established, in accordance with the site and the age of the trees, the longest which extends from 1690 to 1998. The climatic signal contained in these chronologies has been determined using the Grazalema meteorological record, the most complete and extensive among those close to the *Abies pinsapo* forest. The effects of the severe drought that took place in the five years from 1990 to 1995 are indicated, and forest managements are suggested which could mitigate these effects should such a situation recur in the future.

Key words: Spanish fir, Spain, tree rings, dendroecology, aridity.

Introducción

Los abetos circunmediterráneos: taxonomía y biogeografía

El género *Abies* está representado en el entorno del mediterráneo por diferentes especies de taxonomía compleja y controvertida; así como por numerosas subespecies o variedades e híbridos. En la revisión sistemática realizada por Farjon y Rushforth (1989) se considera que estos abetos se deben caracterizar en primer lugar, desde el punto de vista morfológico, por la forma y la longitud de la bráctea tectriz de las piñas. Ésta es exerta y refleja en *Abies alba*, *A. nebrodensis*, *A. cephalo-*

nica y *A. nordmanniana* y, generalmente, corta e incluso en *A. cilicica* (taxones todos ellos de la sección *Abies*); mientras que es siempre inclusiva y muy corta en *A. numidica* y *A. pinsapo*, ambos componentes exclusivos de la sección *Piceaster*. En cuanto a los dos representantes ibéricos del género, *Abies alba* se diferencia además por la forma y disposición de las acículas (siendo en este taxon muy aplanadas y, en general, de ápice obtuso o emarginado y más o menos subdísticas), mientras que en *Abies pinsapo* éstas están dispuestas de manera helicoidal y son gruesas y de ápice agudo.

De acuerdo con Ceballos (1958), Barbero y Quezel (1975) y Quezel (1980, 1985), las diversas condiciones climáticas que rigen en el norte y en el sur de la región mediterránea, especialmente durante el periodo estival, han provocado diferencias en el carácter y extensión actual de estos abetos. *Abies alba*, *A. nord-*

* Autor para la correspondencia: mar.genova@upm.es
Recibido:27-11-06; Aceptado: 08-06-07.

manniana y otros taxones relacionados, forman bosques extensos en las montañas que bordean el norte del mediterráneo y la península anatólica, donde los veranos son más frescos y húmedos y presentan un carácter eurosiberiano o submediterráneo. Por otra parte, los abetos más meridionales, *Abies pinsapo*, *A. numidica* y *A. cilicica*, están constituidos por poblaciones endemovariantes, residuales, aisladas y dispersas y sometidas a una intensa aridez estival, característica del clima mediterráneo más específico.

Resulta destacable la presencia conjunta en la Península Ibérica de los dos taxones más diversos: *Abies alba* y *Abies pinsapo*, que se distribuyen, respectivamente, en la Cordillera de los Pirineos y en las Sierras Béticas, y cuya proximidad geográfica constituye una notable peculiaridad corológica y paleobotánica (Costa *et al.*, 1997).

Estudios dendrocronológicos en abetos circunmediterráneos

Abies alba es el taxon más estudiado entre los abetos circunmediterráneos con, a fecha de revisión del presente trabajo, 306 referencias indicadas en el banco mundial de datos bibliográfico y 56 cronologías publicadas (ITRDB). En Grecia y en Turquía, Kuniholm (1979) ha elaborado algunas cronologías de *Abies borisii-regis* (taxon que, según Farjon y Rushforth (1989), debería más bien considerarse como híbrido de *A. alba* y *A. cephalonica*), *A. cephalonica* y *A. nordmanniana*. Éstas han sido posteriormente utilizadas en reconstrucciones dendroclimáticas de diferente amplitud (Schweingruber, 1985; Schweingruber *et al.*, 1991; Briffa, 1992; D'Arrigo y Cullen, 2001; Hughes *et al.*, 2001). Por su parte, Akkemik (2000) ha elaborado una cronología regional con *Abies cilicica* y ha relacionado su crecimiento con diferentes variables climáticas en tres sistemas montañosos turcos. En España, Gutiérrez *et al.* (1998) elaboran y analizan algunas cronologías de *Abies alba* en el pirineo leridano, Camarero *et al.* (2002) estudian el episodio de decaimiento observado en la década de los 80 en dos abetares aragoneses y Camarero *et al.* (2003) el impacto de una plaga sobre el crecimiento radial de esta especie. Por su parte, Macias *et al.* (2006) presentan de forma exhaustiva una decena de cronologías pirenaicas, extendiéndose la más antigua hasta 1578. En ellas determinan y comparan la respuesta a cambios climáticos recientes entre abetares interiores y periféricos.

Con el presente estudio se aporta información dendroecológica sobre una de las especies forestales más emblemáticas de la Flora Ibérica: *Abies pinsapo*, cuya reducida extensión peninsular y marcado carácter relicto le imprimen una especial sensibilidad frente a futuros riesgos climáticos (IPCC, 2007). Bräker y Schweingruber (1984) elaboraron una cronología, procedente de la Serranía de Ronda, que abarca el período comprendido entre 1728 y 1982. Esta misma cronología se ha utilizado también en otros trabajos que, en el contexto europeo, analizan y comparan datos procedentes de numerosas especies y regiones (Schweingruber, 1985; Schweingruber *et al.*, 1991; Briffa, 1992). En los últimos años hemos realizado varias campañas de muestreo en diversos pinsapares de las serranías béticas españolas con la intención de ampliar la información existente en extensión temporal y en nuevas localidades; algunos de los resultados obtenidos se han presentado en Génova y Muñoz (2003, 2005).

Aquí se analiza la heterogeneidad de los patrones y tendencias del crecimiento radial de *Abies pinsapo* según su edad y condiciones ambientales, así como los cambios bruscos o perturbaciones de las tendencias relacionados con usos o tratamientos forestales y la representatividad de las cronologías elaboradas. Además, se examina el tipo e intensidad de la señal climática que contienen las distintas cronologías, en función de su relación con el registro meteorológico más próximo y el significado de los extremos en los índices de crecimiento. Algunas poblaciones forestales marginales ibéricas presentan una particular sensibilidad a las oscilaciones climáticas (Génova y Fernández, 1998-1999; Macias *et al.*, 2006) y en este sentido ofrece especial interés, en el contexto del cambio climático actual, el estudio de los efectos que causó en los pinsapares la acentuada sequía del primer quinquenio de los 90 del pasado siglo. Ello puede servir de apoyo para estimar la respuesta del pinsapo a las previsibles modificaciones climáticas futuras en el área meridional de la región mediterránea (IPCC, 2007) y sus implicaciones en la gestión forestal.

Material y Métodos

Localidades, secuencias de crecimiento y cronologías

Los datos dendrocronológicos del presente estudio proceden del muestreo realizado a lo largo de varias

campañas durante los años 1998 y 1999. Las muestras fueron extraídas utilizando la barrena de Pressler estándar y el muestreo fue de carácter selectivo y centrado en los ejemplares de mayor interés de cada localidad por su tamaño y edad.

En el Parque Natural de la Sierra de las Nieves se extrajeron muestras en varias localidades diferentes en cuanto a la estructura y edad de la masa forestal. NIEVES I agrupa las procedentes de los barrancos o «cañadas» que configuran la vertiente noroccidental de la Sierra (término municipal de Ronda), entre 1.300 y 1.700 m de altitud (casi hasta el límite forestal) y en situaciones de pendiente media-alta. Aquí se localizan los árboles de mayor porte (entre los árboles muestreados el 90% sobrepasa los 100 cm de DAP) y edad que, en muchos casos, superan los 200 años. La estructura del bosque es heterogénea, más densa en las laderas de los barrancos y más clara y degradada en los interfluvios, y, en general, muy influida por el uso silvo-pastoral. NIEVES II (término municipal de Yunquera) agrupa muestras de otras formaciones más homogéneas, situadas a menor altitud y pendiente (Tabla 1). Sin embargo, aunque los ejemplares muestreados también alcanzan grandes tallas con DAP medio próximo al de los anteriores, en este caso presentan edades considerablemente menores y la media resulta inferior al centenar de años. Junto a las muestras procedentes de árboles vivos, también se ha estudiado una rodaja de un ejemplar apeado en la región en 1997 tras su muerte, en la que se han medido 5 radios en diferentes direcciones.

En el Parque Natural de la Sierra de Grazalema se muestrearon los rodales aislados con aspecto longevo que, en la Sierra del Pinar (ubicada en el término mu-

nicipal de Grazalema), ocupan la periferia de la joven masa principal. Se trata de ejemplares de menor porte que subsisten en suelos esqueléticos y pendientes elevadas (PINAR).

En la medición de los anillos de crecimiento se ha utilizado el medidor semiautomático ANIOL y, para el análisis de las series temporales obtenidas, el programa CATRAS (Aniol y Schleswig, 1991) y el paquete estadístico ITRDB (Grissino-Mayer, 2001). Tras un riguroso proceso de sincronización, se han estudiado los cambios bruscos y las oscilaciones de media frecuencia (programa JOLTS, Holmes, 1999a) en las secuencias datadas, seleccionando periodos relacionados con tratamientos forestales por presentarse de manera sincrónica en numerosos individuos (Lorimer y Frelich, 1989), estableciendo como límite inferior que se determinen, al menos, en el 20% de las secuencias. Se ha seguido la metodología clásica de análisis y elaboración de cronologías (Cook y Kairiukstis, 1990) y los periodos/años característicos comunes en las secuencias y cronologías se han delimitado según se definen en Génova (2000).

Clima y registros meteorológicos

La región ibérica en la que habita *Abies pinsapo* se sitúa en el ámbito del clima mediterráneo. Éste se caracteriza fundamentalmente por una distribución irregular de las precipitaciones y por presentar simultáneamente los máximos térmicos y los mínimos pluviométricos durante el periodo estival, sobreviniendo a finales del verano la máxima escasez hídrica. Sin embargo, la cuantía de las precipitaciones registradas en la región (con totales anuales que, en ocasiones, se aproximan a los 2.000 mm e, incluso, los superan) representa una situación extraordinaria en el contexto de las características climáticas mediterráneo-ibéricas. Algo similar sucede, asimismo, en la cordillera del Tauro, al otro extremo del mediterráneo, donde Akkemik (2000) ha estudiado la respuesta al clima del vicariante *Abies cilicica*.

Las precipitaciones máximas en la región se presentan en las primeras barreras montañas que se enfrentan a la trayectoria habitual de las borrascas atlánticas que penetran en la Península Ibérica por el Golfo de Cádiz. Así, en el macizo de la Sierra del Pinar, que se eleva a más de 1.600 m y que se sitúa a tan sólo unos 80 km del Atlántico, las precipitaciones casi triplican los valores registrados en la costa (Capel, 1981). Las

Tabla 1. Caracterización de las localidades de muestreo y de las secuencias de crecimiento sincronizadas

| | Nieves I | Nieves II | Pinar |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| Término municipal | Ronda | Yunquera | Grazalema |
| Provincia | Málaga | Málaga | Cádiz |
| Coordenadas geográficas | 36°41' N 5°01' W | 36°41' N 4°58' W | 36°46' N 5°25' W |
| Altitud (m) | 1.300-1.700 | 1.050-1.250 | 1.150-1.350 |
| Orientación | NW | NE | N |
| Pendiente media | 30% | 30% | 50% |
| N.º árboles/N.º series | 21/34 | 14/25 | 19/32 |
| N.º de anillos máximo, medio y mínimo | 310, 180, 86 | 106, 82, 53 | 214, 97, 40 |
| Anchura media (mm) y desviación estándar | 1,12 ± 0,52 | 2,70 ± 1,65 | 2,06 ± 1,33 |

masas de aire húmedo y cálido ascienden bruscamente desde el nivel del mar hasta las cotas más elevadas y se van descargando por condensación de vapor, de manera que las precipitaciones disminuyen su cuantía progresivamente hacia el este. Esta situación sucede especialmente en invierno y otoño, cuando las lluvias son más cuantiosas e intensas, tanto que, a menudo, se asemejan al desencadenamiento de las precipitaciones tropicales. Por el contrario, hacia finales de la primavera y el verano, la orientación de los vientos se modifica radicalmente y se incrementa la influencia árida del Norte de África, provocando una disminución de las precipitaciones hasta valores prácticamente inapreciables.

Se han estudiado los registros de las estaciones meteorológicas más próximas geográfica y altitudinalmente al territorio de estudio: Ronda-Quejigales y Gaucín, ambas en la provincia de Málaga, y Grazalema, en la de Cádiz, comprobando que se trata de registros heterogéneos en cuanto a su calidad y extensión. El registro de Ronda-Quejigales procede de la estación situada a mayor altitud (1.180 m) y muy próxima a las formaciones de pinsapar de la Sierra de las Nieves; sin embargo es muy corto e incompleto. Por otra parte, la estación de Grazalema, situada a menor altitud (823 m), pero también próxima a pinsapares (en este caso los de la Sierra del Pinar), presenta el registro más extenso e íntegro, especialmente en cuanto a las precipitaciones (desde 1913), siendo por el contrario más corto el registro de temperaturas (desde 1964).

En Grazalema se registra la mayor cantidad de precipitación anual de la región y es una de las más elevadas de la Península Ibérica (Castillo, 2000). La mayor parte de estas precipitaciones suceden durante el invierno y el otoño, mientras que en primavera son notablemente inferiores. Durante el periodo estival descienden hasta valores mínimos y, además, en su mayor parte se corresponden con las precipitaciones de Septiembre, pues en casi todos los años son nulas en Julio y Agosto. Esta remarcada desigualdad en la distribución estacional de las lluvias origina que la extensión y la intensidad de la aridez sean elevadas, originando un periodo crítico para la supervivencia de las plantas que, en cualquier caso, es superior a dos meses. Las características generales de este registro para el periodo coincidente con las cronologías elaboradas se recogen en la Figura 1.

Las relaciones crecimiento-clima se han examinado de manera integrada a través de la Función respuesta, que aplica complejos modelos de análisis mul-

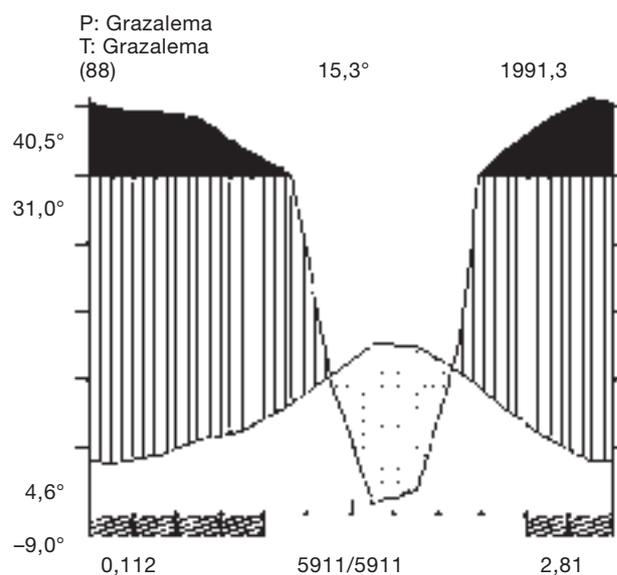


Figura 1. Climodiagrama del registro de la estación de Grazalema (823 m de altitud) en el periodo 1964-1999. Tm: 15,3°C. Tmáx: 40,5°C. Tmín: -9°C. P. anual: 1.991,3 mm. Aridez: 2,81 meses. Heladas probables: 6 meses.

tivariable en componentes principales y estudia la calibración y verificación conjuntamente a través del procedimiento denominado «boot-strap» (Cook y Kairiukstis, 1990). Se han analizado y comparado los resultados obtenidos tras la aplicación de los programas PRECON (Fritts, 1999) y DENDROCLIM2002, el cual facilita la identificación de la señal climática. (Biondi y Waikul, 2004).

Resultados y Discusión

Edad, tendencias del crecimiento y otras oscilaciones de media frecuencia

La sincronización de las secuencias de crecimiento de *Abies pinsapo* ha sido especialmente ardua, pues es elevada la heterogeneidad en la variabilidad del crecimiento y frecuente la ausencia de anillos. Se han datado con fiabilidad 96 secuencias de crecimiento correspondientes a 55 árboles, incluyendo las del árbol muerto. Las 34 secuencias sincronizadas y datadas en NIEVES I son las más largas (media = 180 anillos), mientras que las 25 secuencias sincronizadas y datadas en NIEVES II son más cortas, con una media de 82 anillos (Tabla 1). Las series de crecimiento procedentes de la rodaja han sincronizado perfectamente entre sí y no presentan anomalías; para su datación (dado

que proceden de un árbol ya muerto) se han sincronizado con las procedentes de árboles vivos y se ha elaborado una serie media para el ejemplar (R100).

Se han analizado las características del crecimiento radial de pinsapo, estudiando detenidamente las secuencias sincronizadas. En NIEVESI casi el 75% de los árboles se aproximan a los 200 años de edad (sólo un ejemplar supera los 300 años) y los valores medios del crecimiento son muy homogéneos (oscilan entre un máximo de 1,82 mm y un mínimo de 0,62 mm), presentando un valor medio de $1,12 \text{ mm} \pm 0,52$. NIEVESII agrupa el conjunto de árboles más jóvenes (entre 80 y 125 años); presentan crecimientos medios desde 4,20 mm hasta 1,48 mm y un valor medio de $2,70 \text{ mm} \pm 1,65$. Con las series sincronizadas del árbol apeado se ha elaborado una secuencia promedio hasta la médula de 93 años, cuya media de crecimiento es comparativamente elevada ($4,59 \text{ mm} \pm 2,90$), aunque los valores son muy heterogéneos en el tiempo, tal como indica la elevada desviación estándar. Por su parte, en PINAR casi el 80% de las secuencias sincronizadas se corresponden con árboles de más de 150 años y el 40% se aproximan o superan los 200 años; los valores medios del crecimiento oscilan, generalmente en función de la edad, desde 4,3 mm hasta 0,55 mm y presentan un valor medio de $2,06 \text{ mm} \pm 1,33$.

Las tendencias de las series de crecimiento elaboradas con la anchura de los anillos dependen, entre otros factores, de la edad de los árboles (Fritts, 1976). Por tanto, la variabilidad del crecimiento se ha estudiado,

en primer lugar, por grupos de edad y localidades, teniendo en cuenta únicamente las series con tendencias coincidentes. Así se han elaborado 4 secuencias promedio de diferentes edades. La más larga (N250) se extiende a lo largo del periodo 1764-1998, está elaborada con 21 series procedentes de 13 árboles y puede ser representativa para árboles de unos 200-250 años de edad en la Sierra de las Nieves. N125 y N80 se corresponden con el promedio de crecimiento de árboles más jóvenes de esta misma sierra, en el primer caso elaborada con 18 series procedentes de 10 árboles, mientras que N80 resulta poco representativa pues sólo incluye 8 series procedentes de 4 árboles. Algo más representativa es P150, que incorpora el crecimiento de 12 series procedentes de 7 árboles de unos 150 años de edad en la Sierra del Pinar. A medida que disminuye la edad el número de árboles que incluyen estas series promedio es menor, lo cual está justificado por el tipo de muestreo realizado: selectivo y dirigido hacia los individuos más longevos. Aunque en varios casos —especialmente en los árboles más viejos—, las muestras no recogen la médula (y, por tanto, la edad ha sido estimada por aproximación) y son poco representativos los promedios de los individuos más jóvenes, nos ha parecido de interés presentar los resultados obtenidos. En la Figura 2 se ha representado, junto a los promedios mencionados, la secuencia procedente del pinsapo muerto (R100) y, para apreciar y comparar mejor las tendencias temporales, se han incluido también los modelos «spline» de 25 años ajustados a cada promedio.

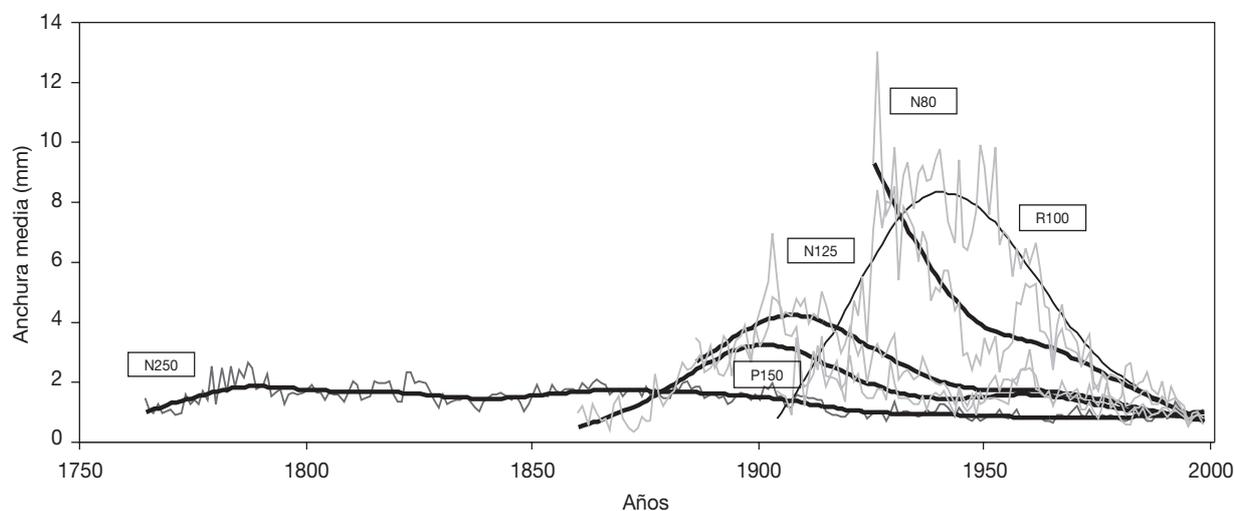


Figura 2. Series promedio y modelos de crecimiento. N250: promedio de crecimiento de árboles de 200-250 años en la Sierra de las Nieves. N125 y N80: promedio de crecimiento de árboles más jóvenes en la Sierra de las Nieves. P150: promedio de crecimiento de árboles de unos 150 años de edad en la Sierra del Pinar. R100: promedio de crecimiento del árbol apeado en la Sierra de las Nieves. Se incluyen también los modelos «spline» de 25 años.

Tabla 2. Características de las series promedio

| Series | N.º árboles | Datación | X | X _j | X ₅₀ | X ₂₀ |
|--------|-------------|-----------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|
| N250 | 13 | 1764-1998 | 1,35 ± 0,44 | | 0,84 ± 0,14 | 0,85 ± 0,15 |
| N125 | 10 | 1886-1998 | 2,38 ± 1,27 | 3,66 ± 1,02 | 1,45 ± 0,47 | 1,08 ± 0,26 |
| N80 | 4 | 1925-1997 | 3,71 ± 2,44 | | 2,58 ± 1,14 | 1,53 ± 0,43 |
| P150 | 7 | 1861-1998 | 1,75 ± 0,95 | 2,76 ± 0,86 | 1,31 ± 0,48 | 0,99 ± 0,30 |
| R100 | 1 | 1904-1996 | 4,60 ± 2,91 | 7,12 ± 1,88 | 4,02 ± 2,53 | 1,71 ± 0,52 |

X: media. x_j: media de la fase juvenil. X₅₀: media de los últimos 50 años. X₂₀: media de los últimos 20 años.

N250, la serie representativa de los árboles más viejos, caracteriza sobre todo una larga etapa madura estable y homogénea, aunque se distinguen dos fases en función de la edad: una primera fase de crecimientos algo más elevados (1,61 mm de media), tras la que se produce un cambio de tendencia hacia crecimientos menores (inferiores a 1 mm) durante, aproximadamente, la totalidad del siglo XX (Tabla 2).

En árboles más jóvenes (P150, N125 y R100), donde sí se han podido medir los crecimientos hasta la médula o sus inmediaciones, se observa una etapa inicial de establecimiento (en general de escasos crecimientos), que se puede circunscribir a los 15-20 primeros años de vida, la cual se continúa con las fases juvenil y madura. En la fase juvenil (30-40 años) los crecimientos medios son comparativamente muy elevados y parecen indicar escasa competencia por los recursos, tanto en las secuencias más antiguas como en las más recientes. La fase más madura presenta una tendencia exponencial decreciente, muy marcada en R100 y N80 (donde la fase juvenil es mucho más corta e incom-

pleta) y, matizada por determinadas oscilaciones de media frecuencia, en P150 y N125.

Los crecimientos de las últimas décadas son comparativamente muy bajos, especialmente en las secuencias más cortas (Tabla 2), y sobre todo en R100, pues tras los mínimos correspondientes a 1995 y 1996 (0,66 y 0,63 mm, respectivamente), no hubo engrosamientos y el ejemplar murió. Asimismo, las tendencias en esta última etapa son llamativa y significativamente decrecientes, sobre todo en los árboles más jóvenes y de mayor crecimiento; sólo en la secuencia más larga (correspondiente a los árboles más longevos) la tendencia se corresponde con un ligero incremento.

El análisis de los cambios y oscilaciones bruscos de media frecuencia en las tasas anuales de crecimiento, efectuado con todas las series datadas agrupadas según su localidad y durante el siglo XX, sólo ha presentado resultados posiblemente relacionados con tratamientos forestales en NIEVESII (Fig. 3). En las otras localidades, estos cambios o perturbaciones de la tendencia general (liberaciones y supresiones) son asin-

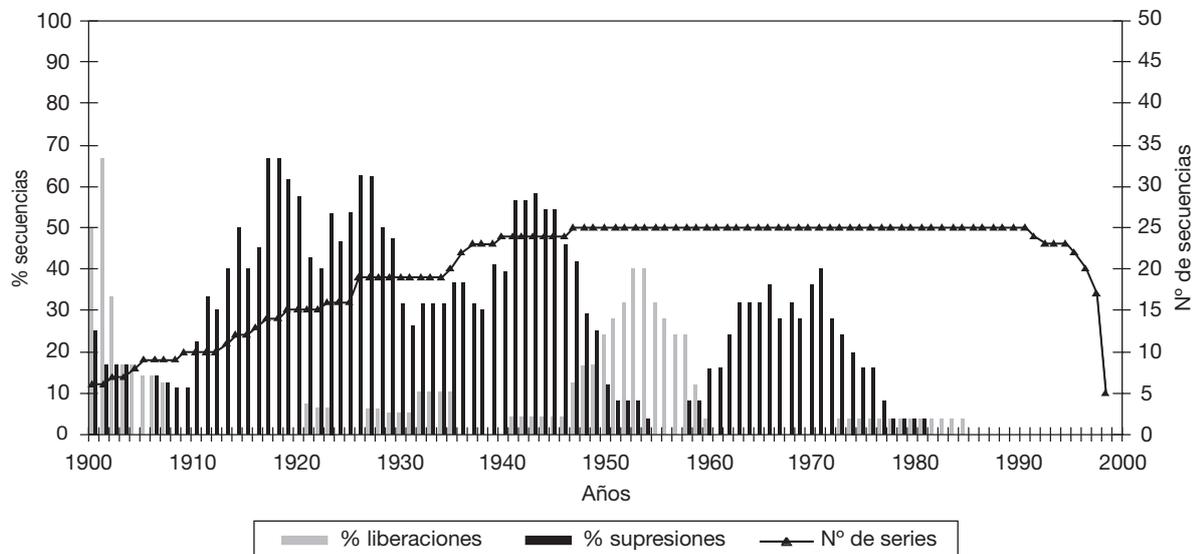
**Figura 3.** Cambios bruscos del crecimiento determinados en las secuencias de NievesII.

Tabla 3. Características de las cronologías: longitud, fecha a partir de la cual es representativa y fiable (Concordancia Poblacional —CP— > 0,85), valor del coeficiente señal/ruido (SR) en el período 1925-1995 y coeficientes de intercorrelación por períodos

| Cronologías | Longitud/ CP > 0,85 | SR | Correlación por períodos | | | | | | | |
|-------------------|------------------------|-------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 1775-1824 | 1800-1849 | 1825-1874 | 1850-1899 | 1875-1924 | 1900-1949 | 1925-1974 | 1980-1999 |
| NievesA | 1690-1999/1820 | 12,17 | 0,49 | 0,44 | 0,43 | 0,47 | 0,56 | 0,60 | 0,68 | 0,61 |
| NievesB | 1887-1998/1925 | 4,26 | | | | | 0,44 | 0,43 | 0,60 | 0,53 |
| SPinar | 1788-1999/1910 | 6,64 | 0,49 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,57 | 0,57 |
| Correlación media | | | 0,49 | 0,44 | 0,43 | 0,45 | 0,47 | 0,47 | 0,62 | 0,57 |

crónicos, nunca coincidentes en más de un 20% de las secuencias, o siguen patrones vinculados con variaciones individuales.

Entre un 22-66% de las secuencias de NIEVESII evidencian supresiones o descensos acusados en el grosor de los anillos desde 1910 hasta casi 1950 y, en dos periodos: 1913-1929 y 1941-1947, este tipo de perturbación se localiza en más del 40% de las secuencias. Ello indica una situación de elevada competencia entre individuos relacionada con una alta densidad de la masa forestal. En 1950-1958 se localiza el único episodio notable de incrementos bruscos o liberaciones (en el 24-40% de las series) sustituido, más tarde, por otra nueva etapa de supresión (en 1962-1973 y en el 24-40% de las secuencias). El aumento del furtivismo en la extracción de pinsapos, para la construcción de cortijos en los años posteriores a la Guerra Civil (comunicación personal de José López Quintanilla, asesor técnico del Parque Natural de la Sierra de las Nieves) incidió en la reducción de la competencia entre árboles y, por tanto, se incrementó el crecimiento en la década de los 50. Posteriormente, de nuevo estos árboles compiten entre sí y disminuye el crecimiento, situación que se mantiene hasta nuestros días.

Cronologías y años característicos

Las series de crecimiento sincronizadas y datadas se han estandarizado y promediado en tres cronologías locales: NievesA, NievesB y SPinar. Después de realizar numerosas pruebas de estandarización, se ha comprobado que la técnica de modelización por «splines» es la que resulta más adecuada para maximizar la variabilidad común y el periodo de 25 años el más conveniente en nuestro caso y, por esa misma razón, se ha seleccionado la cronología residual para posteriores estudios dendroclimáticos.

Como indicadores de la representatividad y fiabilidad de las cronologías, se ha incluido en la Tabla 3 la fecha a partir de la cual la Concordancia Poblacional supera el valor 0,85 y, además, el valor del coeficiente Señal/ruido para el siglo precedente. NievesA constituye la cronología de pinsapo más larga elaborada hasta el momento (310 años, 1690-1999), supera en 55 años a la publicada anteriormente por Bräker y Schweingruber (1984) y, además, es muy fiable y representativa de la población analizada para casi los últimos 200 años. No ocurre lo mismo con NievesB (112 años, 1887-1998), sólo suficientemente fiable a partir de 1925, y SPinar (212 años, 1788-1999), algo más representativa (Tabla 3 y Fig. 4). La sincronía entre las cronologías locales (Tabla 3) se ha examinado mediante el análisis de intercorrelación por periodos del programa COFECHA (Holmes, 1999b). Los resultados indican que, durante el periodo común de análisis (siglo XX), la correlación es más elevada en su segunda mitad.

Entre los años característicos comunes determinados en este mismo periodo (siglo XX, Fig. 5), 1924, 1943, 1965 y 1995 se corresponden con los mínimos índices de crecimiento. Los años 1924, 1943 y 1965 ya habían sido señalados en este mismo sentido para el Sistema Central (Génova, 2000) y, por tanto, están relacionados con eventos macroclimáticos. Además, destaca también muy significativamente el mínimo correspondiente al año 1910, exclusivamente en las series de crecimiento de la Sierra del Pinar; que por tanto se debe atribuir a un evento local muy notable. Por su parte, 1903, 1914 y 1960, destacan por sus máximos crecimientos relativos.

La variabilidad climática en Grazalema

La interpretación de las causas que han originado variaciones comunes en las diferentes cronologías de

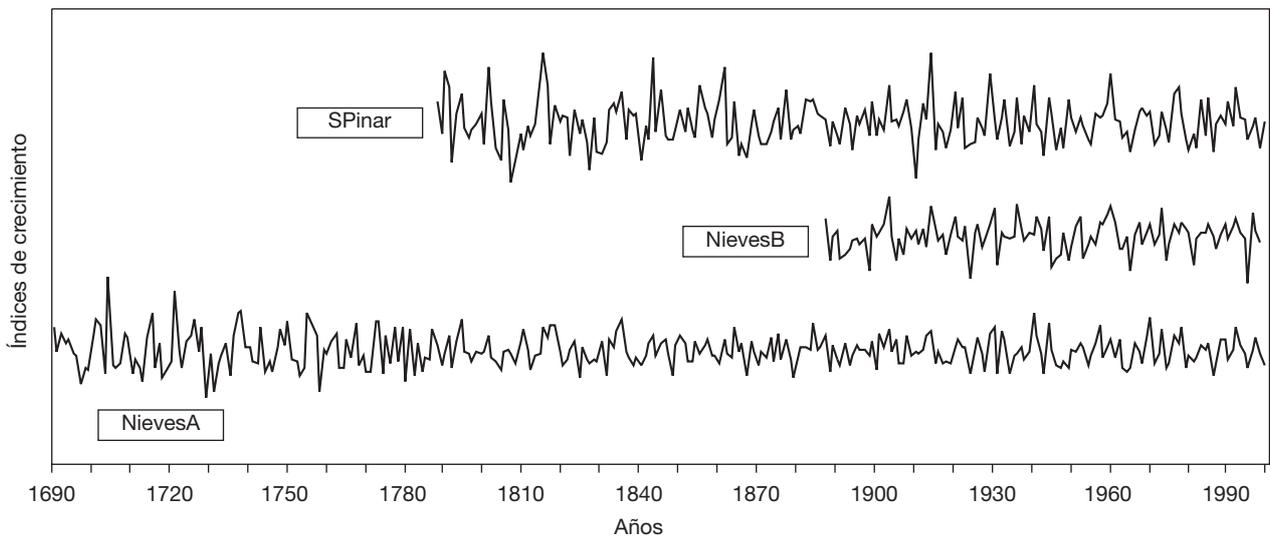


Figura 4. Cronologías locales de *Abies pinsapo*.

Abies pinsapo debe centrarse (por razones obvias) en el análisis de las oscilaciones climáticas. Para analizar la variabilidad del registro de la estación de Grazales, se han estimado, en primer lugar, los escasos datos ausentes con el programa MET (DPL, Holmes, 1999c). El registro de temperaturas disponible comienza en 1964, de manera que el periodo coincidente con las cronologías únicamente se extiende a

lo largo de 36 años (1964-1999) y los datos ausentes sólo suponen un 0.6% del total. El primer quinquenio del registro se corresponde con los años más cálidos, mientras que posteriormente (durante la década de los 70) se registra un periodo de descenso térmico, en el que destaca 1972 por ser el año más frío del registro y 1978 por ser el de temperaturas primaverales más frías (Fig. 6).

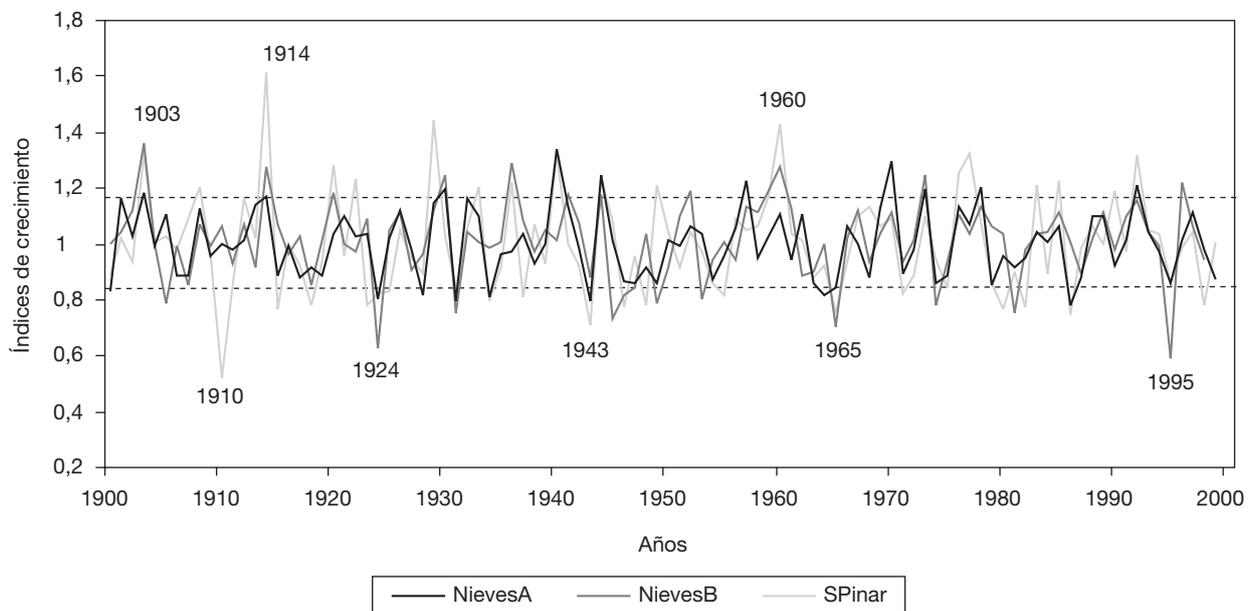


Figura 5. Años característicos comunes por sus máximos (1903, 1914, 1960) y mínimos (1924, 1943, 1965, 1995) crecimientos relativos en las cronologías locales de *Abies pinsapo* durante el siglo XX. Se incluye también el año 1910, correspondiente a un año de mínimo extremo sólo en la Sierra del Pinar.

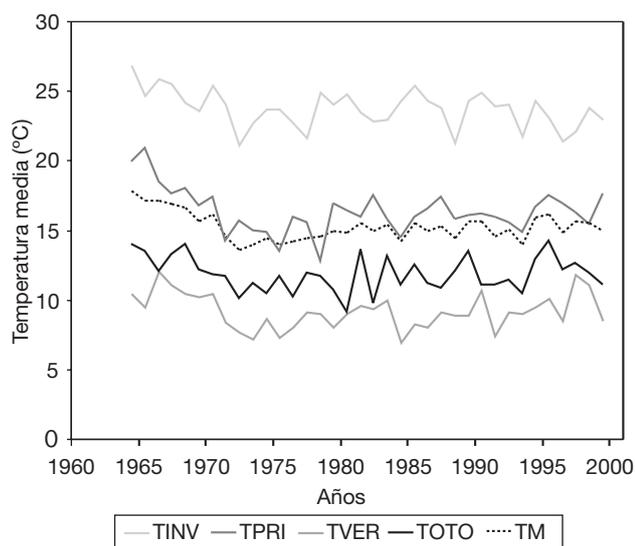


Figura 6. Variabilidad térmica estacional y anual en el registro de la estación meteorológica de Grazalesa.

El registro de precipitaciones es más largo y abarca desde 1913 a 1999, del que únicamente no se poseen los datos correspondientes a dos meses. Las precipitaciones anuales registradas son extraordinariamente variables y oscilan desde un máximo de 3.508 mm, en el año 1960, hasta un mínimo de 744 mm en el año 1995. Se debe destacar que la variabilidad de la precipitación anual está muy relacionada con la precipitación invernal ($R^2=0,80$) que, además es el componente pluviométrico mayoritario, y menos con la otoñal ($R^2=0,61$);

siendo muy baja la relación con las precipitaciones primaverales y prácticamente nula con las estivales (Fig. 7). Las precipitaciones primaverales y estivales (entre abril y septiembre) constituyen sólo en torno al 20% de la precipitación total anual, similar a lo que indica Akkemik (2000) para las montañas del Tauro en Turquía.

Las primeras décadas del registro de Grazalesa fueron húmedas, mientras que las décadas de los 40 y de los 50 se pueden considerar más bien secas. El periodo de mayores precipitaciones se corresponde con el primer quinquenio de los 60 y el más seco con el primer quinquenio de los 90 (Fig. 8). Si el periodo de datos disponible se divide en dos tramos (1913-1956 y 1957-1999), el primero resulta más homogéneo y lluvioso y presenta un mayor número de años muy húmedos, mientras que el segundo es mucho más variable (comprende tanto el quinquenio más húmedo como el más seco) y, en conjunto, más seco. La disminución de las precipitaciones en la segunda mitad del siglo respecto a la primera se puede cifrar entre un 7-9% y además éste último presenta una mayor frecuencia de años muy secos. Además, la línea de regresión marca una tendencia claramente descendente (Fig. 8). Los años más extremos del registro se recogen en la Tabla 4.

Crecimiento y clima

Se ha analizado la señal climática que contienen las cronologías de *Abies pinsapo* a través de diversos mé-

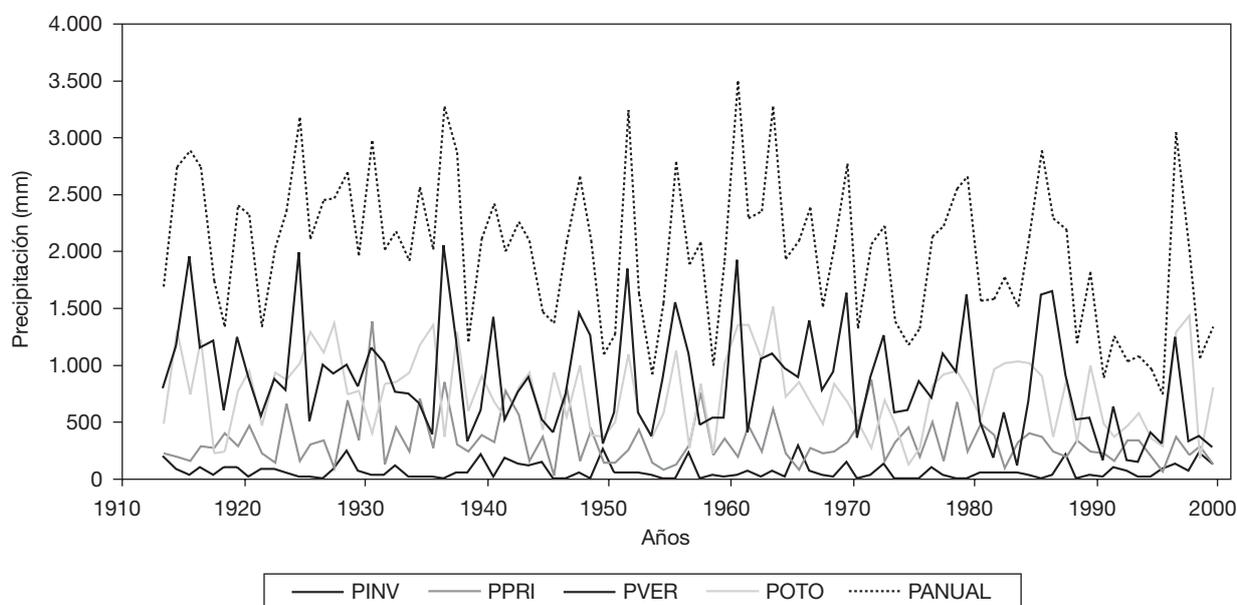


Figura 7. Variabilidad pluviométrica estacional y anual en el registro de la estación meteorológica de Grazalesa.

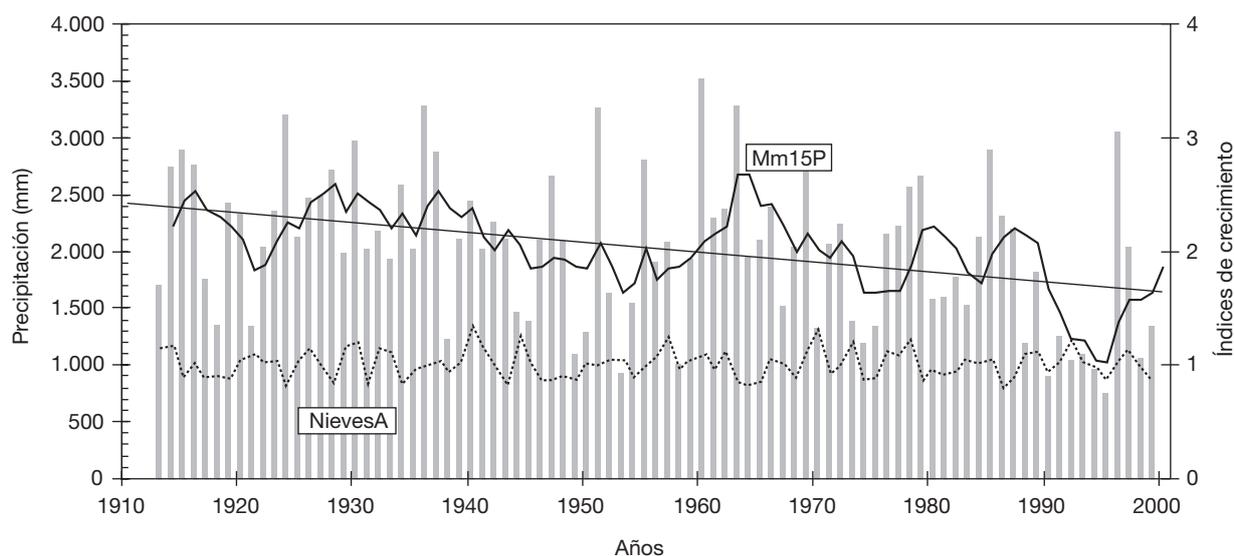


Figura 8. Variabilidad pluviométrica anual en el registro de la estación meteorológica de Grazalema. Las barras se corresponden con los valores anuales y las líneas continuas la tendencia que marca la media móvil de 5 años (Mm15P) y la recta de regresión. La línea inferior punteada representa los valores de la cronología NievesA para ese mismo período.

todos. El análisis de las funciones respuesta frente a las variables térmicas y pluviométricas mediante el programa Precon, muestra que la varianza total explicada por el clima es más elevada en la cronología NievesA (70%), correspondiente a los árboles más viejos (Tabla 5). Con este tipo de análisis ninguna variable mensual resulta significativa al 95%, aunque si parece evidente que los factores más limitantes se corresponden con la precipitación primaveral durante el periodo vegetativo y la temperatura y la precipitación estival del año anterior (Fig. 9). Con una metodología similar, Akkemik (2000), en su estudio de *Abies cilicica* en Turquía, obtiene una menor varianza explicada por el clima (entre 30-60%) y, como uno de los prin-

cipales factores limitantes del crecimiento, la precipitación primaveral.

La escasa longitud del periodo de registro de temperatura de Grazalema (36 años), no es suficiente para el análisis de las respuestas del crecimiento con el más riguroso programa Dendroclim2002. Así, dicho análisis únicamente se ha realizado con el registro de precipitación (87 años), obteniendo como variables mensuales significativas y positivamente relacionadas con el crecimiento las indicadas en la Tabla 5. En síntesis, son la precipitación del mes de septiembre del año anterior al crecimiento y la precipitación primaveral los factores más incidentes.

Tabla 4. Años climáticamente extremos (que se desvían en más de 1 desviación estándar de la media) en el registro de la estación meteorológica de Grazalema

| Años extremos | |
|---------------|--|
| Fríos | 1972-73, 1975-76, 1984, 1993 |
| Cálidos | 1964-68, 1970, 1995 |
| Húmedos | 1914-16, 1924, 1928, 1930, 1936-37, 1951, 1955, 1960 , 1963, 1969, 1985, 1996 |
| Secos | 1918, 1921, 1938, 1949-50, 1953, 1958, 1970, 1974-75, 1988, 1990-1995 , 1998 |

En negrita y cursiva se han señalado el año de máximo pluviométrico y el periodo de mínimos pluviométricos.

Tabla 5. En la primera columna los valores R^2 referidos al modelo de regresión entre las cronologías y las 28 variables termopluviométricas para el periodo 1965-1999. En la segunda columna (para el modelo con 14 variables pluviométricas y en el periodo 1914-1999), los coeficientes de regresión significativos al 95% y su variable correspondiente

| Cronologías | P-T (35 años) | P (86 años) |
|-------------|---------------|--|
| NievesA | 0,69 | 0,17 (ago t-1) 0,29 (sep t-1) 0,28 (jun t) |
| NievesB | 0,56 | 0,19 (abr t) 0,23 (may t) |
| SPinar | 0,55 | 0,28 (sep t-1) |

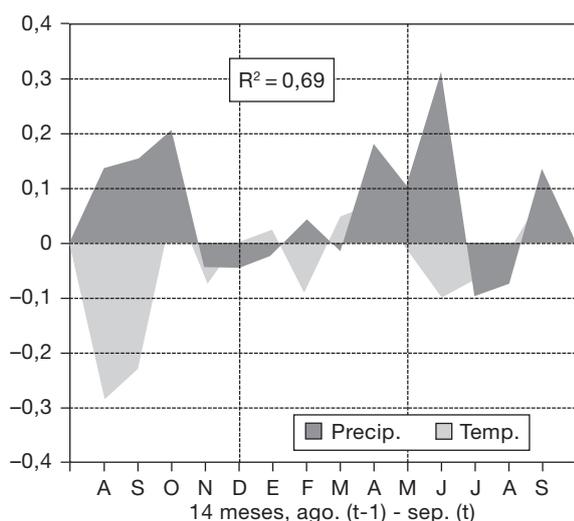


Figura 9. Representación de la Función Respuesta elaborada con el programa Precon entre la cronología NievesA y el registro mensual térmico y pluviométrico de la estación de Grazales para el periodo 1965-1999. En ordenadas los valores de los coeficientes de regresión y en abscisas el periodo de meses analizado.

Se ha analizado también la posible correspondencia entre extremos climáticos y periodos o años característicos por sus índices anómalos de crecimiento. El mínimo de crecimiento registrado en 1995 coincide con un mínimo pluviométrico (culminación del quinquenio más seco del registro, ver Figs. 7 y 8). El mínimo de 1965 coincide con el extremo térmico primaveral absoluto (que supera en más de 4,5°C a la media del registro, ver Fig. 6) y además con escasas precipitaciones durante esta misma estación (2º mínimo del registro). Por su parte, los máximos crecimientos relativos detectados en 1960 coinciden con el máximo absoluto de precipitaciones.

Los índices dendrocronológicos extremos registrados en los últimos años de las secuencias y, sobre todo, las notables disminuciones de la anchura de anillos en numerosos árboles (y precisamente no en los más longevos), están relacionados muy probablemente con la intensa aridez sufrida en la región en el primer quinquenio de los 90. Ello nos mueve a reflexionar sobre la conveniencia de aplicar medidas de gestión que preserven los ejemplares más longevos, más resistentes y mejor adaptados a condiciones desfavorables y que son, al fin y al cabo, una garantía de futuro.

Conclusiones

En este estudio, sobre el crecimiento en grosor de *Abies pinsapo*, se han datado con fiabilidad 96 se-

cuencias de crecimiento correspondientes a 55 árboles, incluyendo las obtenidas de un árbol que fue apeado tras su muerte.

Los árboles más longevos, que superan los 200 años, presentan tendencias de crecimiento bastante estables y anchuras de anillo próximas a 1 mm, mientras que en árboles más jóvenes este parámetro se aproxima en media a los 2 mm. En las últimas décadas del siglo XX (especialmente en los años 80 y 90), el crecimiento en grosor disminuye notoriamente en los árboles más jóvenes, mientras que se mantiene o incrementa ligeramente en los longevos.

En los pinsapares jóvenes de la Sierra de las Nieves se han identificado determinados periodos en los que se evidencian cambios bruscos en las tendencias generales del crecimiento. Las perturbaciones (supresiones en 1910-1948 y 1962-1973, liberaciones en 1950-1958) indican una situación inicial de elevada competencia entre pinsapos, posteriormente modificada, posiblemente, por el aumento del furtivismo en la extracción de fustes para construcción durante la posguerra.

Las series de crecimiento sincronizadas y datadas se han estandarizado y promediado en tres cronologías locales: NievesA, NievesB y SPinar. NievesA constituye, hasta el momento, la secuencia temporal de crecimiento más larga de *Abies pinsapo*, se extiende a lo largo de 310 años, durante el periodo comprendido entre 1690 y 1999 y, además, es muy fiable y representativa de la población analizada para casi los últimos 200 años. No ocurre lo mismo con NievesB (112 años, 1887-1998), sólo suficientemente fiable a partir de 1925, y SPinar (212 años, 1788-1999), algo más representativa para este mismo siglo.

El análisis del registro térmico de la estación de Grazales indica, en el periodo disponible (1964-1999), que el primer quinquenio se corresponde con los años más cálidos y la década de los 70 con los más fríos. Respecto a las precipitaciones el registro es más largo (1913-1999) y extraordinariamente variable, aunque de tendencia descendente; se ha estimado un descenso de las precipitaciones anuales del orden del 7-9% en el periodo 1957-1999, respecto a 1913-1956.

La varianza explicada por el clima es más elevada en la cronología elaborada con los árboles más viejos y las variables mensuales pluviométricas más relacionadas (o más limitantes) con o para el crecimiento son las correspondientes a las del mes de septiembre del año anterior al crecimiento y a la precipitación primaveral del año en curso, indicando la gran importancia que las reservas hídricas tienen para la super-

vivencia de *Abies pinsapo*. Estos resultados son similares a los obtenidos en el vicariante turco *Abies cilicica*, cuyas formaciones se encuentran sometidas a un clima similar.

Se ha analizado también la posible correspondencia entre años característicos por sus índices anómalos de crecimiento y los extremos climáticos. Los mínimos de crecimiento registrados en 1995 y 1965 coinciden con años meteorológicos extremos, el primero con un mínimo pluviométrico anual absoluto y el segundo con el máximo térmico primaveral absoluto. Por su parte, los máximos crecimientos relativos detectados en 1960 coinciden con el máximo anual absoluto de precipitaciones.

La extrema aridez del primer quinquenio de los años 90 del siglo XX en la región, pudo causar, según se deduce de este estudio, descensos drásticos en el crecimiento de *Abies pinsapo* (especialmente en las masas más jóvenes) e, incluso, la muerte de algunos individuos. Se recomiendan, por tanto, medidas de gestión que permitan, por un lado, el mantenimiento de resistentes ejemplares veteranos y, por otro, que reduzcan la excesiva competencia entre árboles más jóvenes, lo cual podría disminuir el riesgo de decaimiento de estas formaciones frente a previsible situaciones futuras de aridez similar.

Agradecimientos

A los Agentes Forestales de los Parques de la Sierra de las Nieves y de Grazalema y a José Luis López Quintanilla por poner a nuestra disposición su apoyo incondicional y sus conocimientos del pinsapar. Ángel Hernández realizó parte del muestreo y cedió amablemente sus datos. Estefanía Muñoz midió las muestras y participó en la realización de análisis preliminares de los datos en el desarrollo de su Proyecto Fin de Carrera. El muestreo fue subvencionado por el Proyecto Format (PL970736) y el análisis de los datos por un programa de colaboración con el Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba. Por otra parte, los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos ayudaron a mejorar sensiblemente la versión inicial de este trabajo.

Referencias bibliográficas

ANIOL R., SCHLESWIG F., 1991. Programa Catras, versión 4.20.

- AKKEMIK U., 2000. Tree-ring chronology of *Abies cilicica* Carr. in the western Mediterranean region of Turkey and its response to climate. *Dendrochronologia* 18, 73-81.
- BARBERO M., QUEZEL P., 1975. Les forests de sapin sur le portour méditerranéen. *Anales Inst Bot Cavanilles* 32(2), 1245-1289.
- BIONDI F., WAIKUL K., 2004. Dendroclim2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303-311.
- BRÄKER O., SCHWEINGRUBER F., 1984. Standortchronologien. Teil 1: Iberische Halbinsel. Publikation der Forstl Vers Anst, Birmensdorf. 73 pp.
- BRIFFA K., 1992. Increasing productivity of «natural growth» conifers in Europe over the last century. En: *Tree rings and environment: proceedings of the International Symposium* (Bartholin T.S., Berglund B.E., Eckstein D., Schweingruber F.H., Eggertsson O., eds). *Lundqua Report* 34, 64-71.
- CAMARERO J., MARTÍN E., GIL-PELEGRÍN E., 2003. The impact of a needleminer (*Epinotia subsequana*) outbreak on radial growth of silver fir (*Abies alba*) in the Aragon Pyrenees: A dendrochronological assesment. *Dendrochronologia* 21, 3-12.
- CAMARERO J., SIMARRO A., MARTÍ E., GIL-PELEGRÍN E., 2002. Aproximación dendroecológica al decaimiento del abeto (*Abies alba*) en el pirineo aragonés. *Montes* 70, 26-33.
- CAPEL J., 1981. Los climas de España. Oikos-Tau, S.A. Ediciones. 429 pp.
- CASTILLO J., 2000. Evolución de la precipitación anual en las regiones pluviométricas andaluzas. Observaciones de geografía comparada sobre las posibilidades de regulación y trasvase de recursos hídricos. *Cuadernos geográficos* 30, 123-141.
- CEBALLOS L., 1958. Los abetos del mundo. *Montes* 80, 1-12.
- COOK E., KAIRIUKSTIS, L., 1990. *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. 393 pp.
- COSTA M., MORLA C., SAINZ H. (eds), 1997. Los bosques ibéricos: una interpretación geobotánica. Ed. Planeta. 597 pp.
- D'ARRIGO R.D., CULLEN H.M., 2001. A 350-year (AD 1628-1980) reconstruction of Turkish precipitation. *Dendrochronologia* 19(2), 169-177.
- FARJON A., RUSHFORTH, K.D., 1989. A classification of *Abies* Miller (*Pinaceae*). *Notes Roy Bot Gard Edinburgh* 46 (1), 59-79.
- FRITTS H., 1999. Program Precon32, Version 5.17b
- FRITTS H., 1976. *Tree ring and climate*. London: Academic Press. 567 pp.
- GÉNOVA M., 2000. Anillos de crecimiento y años característicos en el Sistema Central (España) durante los últimos cuatrocientos años. *Boletín de la Real Sociedad de Historia Natural* 96(1-2), 33-42.
- GÉNOVA M., FERNÁNDEZ A., 1998/1999. Tree rings and climate of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* in Central Spain. *Dendrochronologia* 16-17, 75-86.

- GÉNOVA M., MUÑOZ E., 2003. Anillos de crecimiento y elaboración de series dendrocronológicas en *Abies pinsapo*. Informe realizado para la Junta de Andalucía. 65 pp.
- GÉNOVA M., MUÑOZ E., 2005. Caracterización de los pinsapares desde la perspectiva dendroecológica: determinación de las relaciones entre el crecimiento y el clima. IV Congreso Forestal Español (CD).
- GRISSINO-MAYER H. (comp), 2001. Paquete estadístico ITRDB.
- GUTIÉRREZ E., CAMARERO J., TARDIF J., BOSCH O., RIBAS M., 1998. Tendencias recientes del crecimiento y la regeneración en bosques subalpinos del Parque Nacional D'Aiguestortes i Estany de Sant Maurici. *Ecología* 12, 3-65.
- HOLMES R.L., 1999a. Program JOLTS. Finding growth surges or suppressions in trees.
- HOLMES R.L., 1999b. Users manual for Program COFECHA.
- HOLMES R.L., 1999c. Users manual for Dendrochronology Program Library (DPL).
- HUGHES M.K., KUNIHOLM P.I., EISCHEID J.K., GARFIN G., GRIGGS C.B., LATINI C., 2001. Aegean tree-ring signature years explained. *Tree Ring Research* 57(1), 67-73.
- IPCC, Climatic Change 2007, URL: <http://www.ipcc.ch> [Consulta: 10 mayo, 2007].
- ITRDB, URL: <http://www.ncd.noaa.gov/paleo/treering.html> [Consulta: 10 mayo, 2007].
- KUNIHOLM, P.I., 1979. Aegean dendrochronology, 1979-1980. National Geographic Society Research Report 20, 439-447.
- LORIMER C.G., FRELICH L.E., 1989. A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research* 19(5), 651-663.
- MACÍAS M., ANDREU L., BOSCH O., CAMARERO J., GUTIÉRREZ E., 2006. Increasing Aridity is Enhancing Silver Fir (*Abies alba* Mill.) Water Stress in its South-Western Distribution Limit. *Climatic Change* 79(3-4), 289-313.
- QUEZEL P., 1980. Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. En Pesson (ed): *Actualités d'Ecologie forestière*, 205-256. Ed. Bordas. Paris.
- QUEZEL P., 1985. La flore méditerranéenne: origine, mise en place, endémisme. *Ecologia Mediterranea* 21, 19-39.
- SCHWEINGRUBER F., 1985. Dendroecological zones in the coniferous forests of Europe. *Dendrochronologia* 3, 67-75.
- SCHWEINGRUBER F., BRIFFA K., JONES P., 1991. Yearly maps of summer temperatures in western Europe from A.D. 1750 to 1975 and western North America from 1600 to 1982: Results of a radiodensitometrical study on tree rings. *Vegetatio* 92, 5-71.
- URL: <http://www.01.wsl.ch/dendrobiblio/> [Consulta: 10 mayo, 2007].