

**Dendroecología de *Pinus halepensis* Mill.
en Este de la Península Ibérica e Islas Baleares:
Sensibilidad y grado de adaptación
a las condiciones climáticas**

Montserrat Ribas Matamoros



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**



DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA
PROGRAMA DE ECOLOGÍA AVANZADA BIENIO 1999-2001

**DENDROECOLOGÍA DE *PINUS HALEPENSIS* MILL.
EN ESTE DE LA PENINSULA IBERICA E ISLAS BALEARES:
SENSIBILIDAD Y GRADO DE ADAPTACIÓN
A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS**

Tesis presentada por **Montserrat Ribas Matamoros** para optar al título de Doctora por la Universidad de Barcelona.

El presente trabajo se ha realizado bajo la dirección de la **Dra. Emilia Gutiérrez Merino** (Universidad de Barcelona).

Barcelona, Junio del 2006



CAPÍTULO I

Crecimiento radial y fenología de
Pinus halepensis Mill. en Garraf
y su relación con las condiciones climáticas

INTRODUCCIÓN

Las características del clima mediterráneo ocasionan un doble estrés en la vegetación: la sequía estival (causada por la coincidencia del máximo térmico anual con el mínimo pluviométrico) y las bajas temperaturas invernales (di Castri *et al.* 1981, Terradas y Savé 1992). De esta manera, aunque la disponibilidad de agua en verano se considera el principal factor limitante del desarrollo de la vegetación y de la distribución de las especies en el área mediterránea (Mooney *et al.* 1999, Keller *et al.* 1997), las bajas temperaturas invernales también afectan al crecimiento vegetal del mismo modo que ocurre en las regiones templadas (Cherubini *et al.* 2003).

La mayoría de los GCM predicen, para la región mediterránea occidental, un aumento de temperatura de entre 1,7° y 3,8° C durante el presente siglo (Palutikof y Wigley 1996, Rambal y Hoff. 1998). Además, es muy probable que el estrés hídrico aumente substancialmente en las regiones mediterráneas en un futuro próximo debido no sólo a las elevadas temperaturas, sino también a la menor precipitación y a los cambios en el régimen de las lluvias (IPCC 2001, González-Hidalgo *et al.* 2001). Consecuentemente, se prevé un aumento en la frecuencia y en la intensidad de las sequías severas que, a su vez, repercutirá sobre el desarrollo de la vegetación, la distribución geográfica de las especies y la composición y estabilidad de los ecosistemas (IPCC1991, Palutikof *et al.* 1996, Bakkenes *et al.* 2002, Geeson *et al.* (eds.) 2002, Gracia *et al.* 2002).

En este sentido, es necesario conocer la capacidad de adaptación de la vegetación a las condiciones climáticas (Jéftic *et al.* 1996) y para ello, hace falta entender las regularidades y patrones temporales del crecimiento de las especies. Tal y como Zamora y Pugnaire (2001) expresan: "la variabilidad climática se refleja en el funcionamiento de los ecosistemas, de modo que, hoy en día, es necesario mantener investigaciones a largo plazo en los ecosistemas mediterráneos para conocer sus características y ponerlas en relación con la variabilidad del clima". Desde finales del siglo XX, se han detectado cambios en la fenología, en la amplitud de hábitat de las especies y su área de distribución, y en la composición específica y dinámica de las comunidades (Walkovsky 1998, Bradley *et al.* 1999, Menzel y Fabian 1999, Chapin *et al.* 2000, Chuine y Beaubien 2001, Peñuelas y Filella 2001, Menzel 2002, Walther *et al.* 2002, Peñuelas y Boada 2003). Estas alteraciones se han relacionado con el cambio climático actual (Parmesan y Yohe 2003, Root *et al.* 2003). A pesar de ello, los estudios fenológicos sobre la respuesta de la vegetación mediterránea a la variabilidad climática intraanual e interanual son todavía muy escasos.

Los anillos de crecimiento de los árboles son una fuente de datos ambientales muy valiosa porque la actividad del cámbium es muy sensible a las condiciones del entorno (Gutiérrez *et al.* 1998) y está fuertemente condicionada por el clima (Fritts 1976, Orwing y Abrams 1997). Se trata de una variable controlada genéticamente cuyo ritmo ha evolucionado bajo las restricciones ambientales de cada región (Liphshitz y Lev-Yadun 1986). Consecuentemente, el comportamiento fenológico del crecimiento en grosor del tronco (crecimiento radial) refleja cómo las

plantas aprovechan los períodos climáticamente favorables (Attolini *et al.* 1990) y es uno de los parámetros más adecuados para investigar la adaptación y respuesta de las plantas a las condiciones ambientales (Avila *et al.* 1975, Creber y Chaloner 1984). El monitoreo de parámetros ecológico-funcionales, como el crecimiento radial, durante un período de tiempo suficientemente largo (más de 10 años) y con una frecuencia elevada, permitirá conocer con más precisión las posibles respuestas que puede tener la vegetación a las condiciones climáticas futuras mediante el refinamiento de los modelos (Montoya y López 1997, Rathgeber *et al.* 2005). Este tipo de estudios también aportan información muy valiosa para poder predecir las posibles repercusiones de los eventos climáticos extremos; los cuales son, en la actualidad, muy frecuentes en el clima mediterráneo (Montoya 1995). Un claro ejemplo lo encontramos en la sequía de 1994 que causó daños considerables y una elevada mortalidad en los bosques españoles (Martínez-Vilalta *et al.* 2002, Lloret *et al.* 2004).

En el presente capítulo se muestran los resultados más relevantes del seguimiento del crecimiento radial del pino carrasco en el Garraf (NE de España) a lo largo de los últimos diez años. En primer lugar, se detalla el clima de la zona de estudio mediante la descripción de las condiciones climáticas acontecidas y de su variabilidad intraanual e interanual. Una descripción más genérica y dentro de un marco histórico más amplio, se desarrolla en el capítulo II. En segundo lugar, se presenta la caracterización del crecimiento radial del pino carrasco en el Garraf, prestando especial interés en determinar qué condiciones climáticas lo modulan. Dicho de otro modo, se delimita el período de crecimiento radial de la especie, se presenta su patrón de crecimiento anual, y se pone de manifiesto qué variables climáticas regulan las tasas del crecimiento en perímetro del tronco, y cuáles determinan su inicio y su cese. También se evalúa qué efecto han podido tener las condiciones del entorno inmediato de los árboles (microambiente) sobre las tasas de crecimiento en perímetro y su relación con las condiciones climáticas. Por último, se ilustra la relación existente entre las tasas de crecimiento en perímetro registradas con los dendrómetros y las características anatómicas del anillo de crecimiento mostrando como ejemplo la estructura y las oscilaciones intraanuales en la densidad de la madera en el año 2001.

EL CLIMA DE BEGUES: PERÍODO 1995-2004

La temperatura media (TM) anual de Begues ha oscilado en los últimos 10 años alrededor de los 13,80° C. La temperatura media de las máximas (TMA) anual es de 17,55° C y la media de las mínimas (TMI) es de 10,80° C. El mínimo absoluto del período 1995-2004 se encuentra en enero de 1995 con -6,5° C y el máximo, en agosto del 2003 con 34,2° C. La amplitud térmica (Ampl. T^a) anual promedio del período analizado es relativamente elevada (14,37° C), a pesar que la localidad estudiada se encuentra cerca del mar. Una explicación la encontramos en la disminución de la influencia de las masas de aire marítimo que provoca el Massís del Garraf, especialmente en invierno (Panareda 1986, Miró 2005). Sus valores extremos se encuentran en agosto (TM de 21,87° C) y en enero (8,31° C de TM). La precipitación (PR) media anual es de 689,29 mm, existiendo una enorme variabilidad entre años.

El régimen pluviométrico estacional es O-I-P-V (otoño-invierno-primavera-verano) y el régimen térmico es V-P-O-I, siendo la estación más seca, la más calurosa. No obstante, las condiciones hídricas de cada año pueden diferir cuantiosamente de los valores promedio debido a la enorme variabilidad interanual. Una clara evidencia de dicha variabilidad es la diferencia en la precipitación anual registrada en el período analizado. El año más lluvioso de este período fue 1996 con 1128,57 mm y el más seco el año 2000 con 474,74 mm.

La figura I-1 muestra la precipitación acumulada (PR) y la temperatura media (TM) calculadas entre pares de días consecutivos de muestreo. La escala de las abscisas en dicha figura mantienen la relación PR:2·TM en concordancia con la definición de período seco de Gaussen (Fidalgo 1988). Las condiciones climáticas de cada año han sido distintas, no sólo atendiendo a la duración e intensidad del período seco, sino también, a cuándo se ha producido. No obstante, todos los años presentan un período seco, aunque en algún caso éste puede ser muy suave, como ocurrió en 1996 y 2002. En estos dos años las precipitaciones fueron bastante abundantes (1128,57 y 1070,37 mm anuales), de manera que el período seco fue muy corto y poco pronunciado; además, en 1996, las temperaturas fueron bajas, especialmente las mínimas (promedio anual de 9,95° C). El 2003 es el que presenta una sequía estival más severa, seguido de 1998. Este año también fue también muy caluroso, presentando una TM anual de 14,24° C. En 1995, la falta de agua fue considerable, en especial porque tuvo lugar un período seco a finales de invierno-principios de primavera, previo a la sequía estival. La condiciones climáticas de los años 1999 y 2000 fueron muy similares, presentando ambos un corto período seco a finales de invierno y, otro más severo y largo en verano. En el resto de años (1997 y 2001), el período seco empezó en marzo y terminó en septiembre pero fue poco acusado gracias a las esporádicas lluvias de verano, las cuales fueron especialmente cuantiosas en el año 2001 (132,54 mm), de manera que el período seco estival se interrumpió.

Los resultados obtenidos en la caracterización de los períodos secos de cada año se presentan en la tabla I-1. Destaca la breve duración de éstos en los años 2002 y 1996 (39 y 58 días, respectivamente), y el número elevado de días secos en 1998, con una duración del período seco de más de cinco meses (162 días

secos consecutivos). También en el año 2003 el número de días secos consecutivos fue elevado (más de cuatro meses).

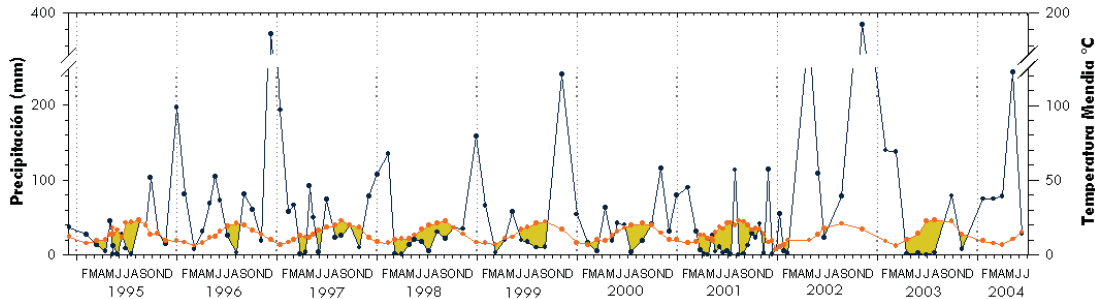


Figura I-1. Precipitación acumulada (círculos azules) y temperatura media (círculos naranjas) calculados entre pares de días de muestreo consecutivos en Begues (Garraf). En amarillo se destaca el área del período seco según el criterio de Gausson ($PR < 2 \cdot TM$).

Año	Área (píxeles)	Perímetro (píxeles)	Núm. días secos	Máx. Núm. días secos seguidos
1995	5579	745,56	182	61
1996	2235	256,55	58	52
1997	4600	679,77	165	63
1998	6946	779,40	220	154
1999	5199	541,66	147	106
2000	4345	530,58	144	95
2001	9765	997,29	228	77
2002	719	174,95	39	20
2003	8488	655,55	178	137

Tabla I-1. Características cuantitativas de los períodos secos de cada año, según la definición de Gausson ($PR = 2 \cdot TM$), en Begues (Garraf). Para más detalles, ver texto.

La figura I-2 muestra la evolución intraanual del índice de aridez de Martonne para cada uno de los años del seguimiento y su valor promedio para el período 1995-2004. Como denominador común en todos los años excepto en el 2001 (año en el que las lluvias de verano fueron elevadas), la disponibilidad de agua en julio ha sido insuficiente para el desarrollo de la vegetación arbórea (valores inferiores a 15 para el índice de Martonne; según Fidalgo 1988). No obstante, resaltan las enormes diferencias existentes en la disponibilidad de agua entre años. La más evidente es la duración del período seco estival, que oscila entre uno y más de cuatro meses en 1996 y 1998, respectivamente. También existen diferencias notables en el momento en el que empieza y termina el período seco. Si bien lo habitual es que empiece la sequía en mayo, en algunos años como por ejemplo en el 2003 se ha producido un breve período seco en marzo; en otros, como por ejemplo en 1995 empezó en abril y; en otros no empezó hasta el mes de junio (1996, 2000 y 2002). En general, la falta de agua suele terminar con las lluvias de finales de agosto o principios de septiembre, pero en años como el 2004, la sequía no acabó hasta el mes de octubre.

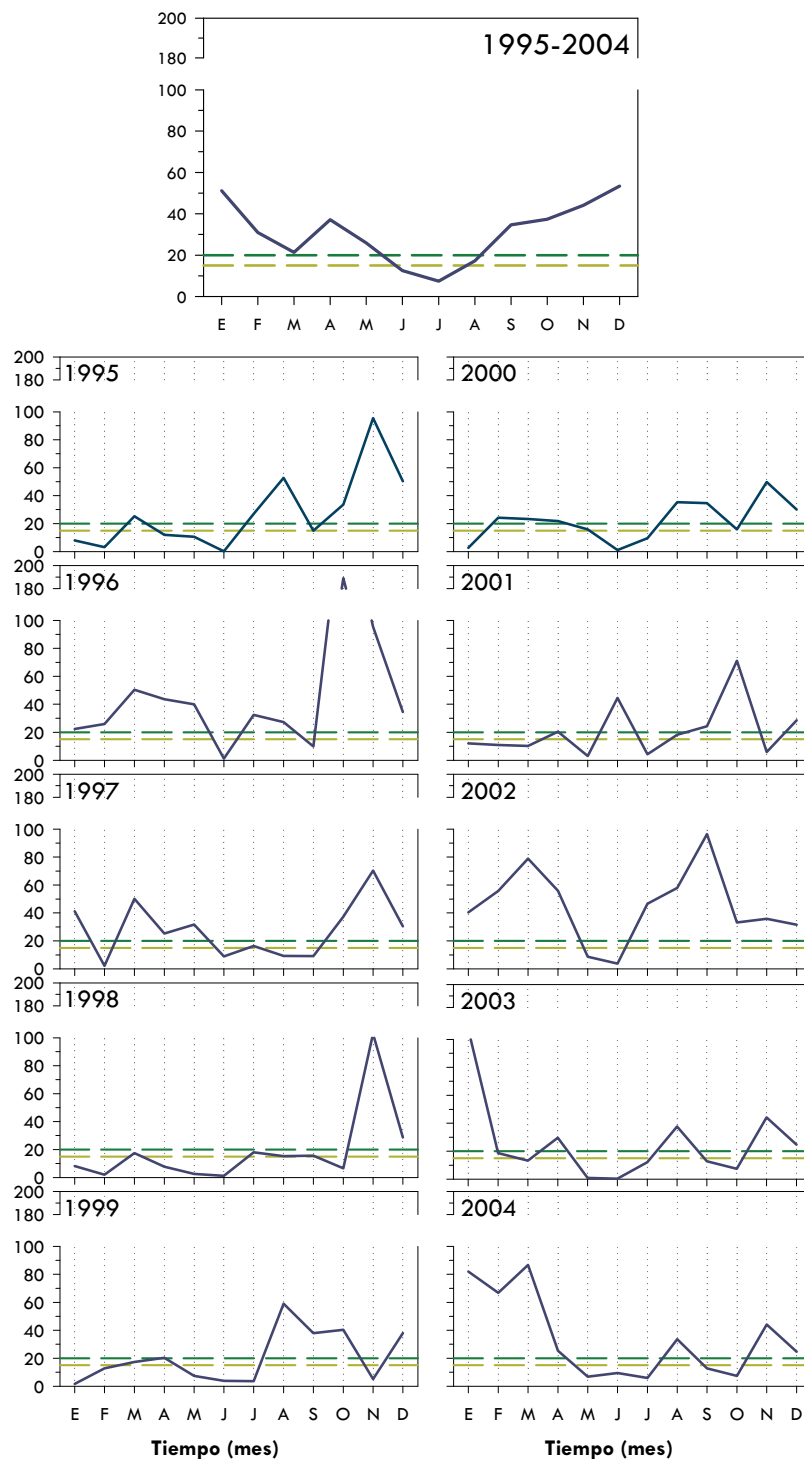


Figura I-2. Índice mensual de aridez de Martonne calculado para el conjunto de años del período 1995-2004 y para cada año por separado según los datos de PR y TM registrados en el observatorio de Begues, Garraf. Las líneas discontinuas muestran los valores umbrales, por debajo de los cuales, se considera que no puede desarrollarse vegetación arbórea (línea verde), ni vegetación arbustiva (línea verde claro). Para más detalles, ver texto.

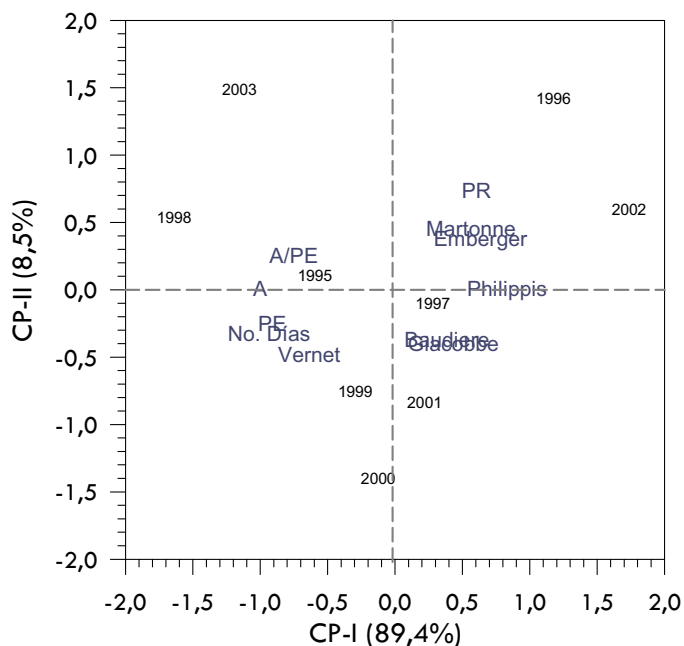


Figura I-3. Diagrama de ordenación obtenido mediante un ACP basado en la matriz de correlaciones de los índices fitoclimáticos anuales de aridez de Martonne, Baudiere, Emberger, Phillipis y Giacobbe, del índice de continentalidad de Vernet, de la precipitación total anual (PR), del número de días secos y de la intensidad del período seco (A - área, y PE - perímetro de $PR/2 \cdot TM$). Para más detalles, ver texto.

También se sitúa en el primer cuadrante, el año 1995, atendiendo al elevado número de días secos que presentó. Los años 1997 y 2001 quedan ubicados en el cuarto cuadrante debido a su escasa aridez de los meses de verano (tal y como expresan los índices de Baudiere y Giacobbe). En los años 1999 y 2000 sin embargo, el factor que les distingue es la baja amplitud térmica anual. El año 2000 también se caracteriza por presentar unas condiciones de disponibilidad hídrica en verano más favorables (65,75 mm en verano) que las que esperaríamos si sólo tuviéramos en cuenta la escasa pluviometría anual (474,74 mm).

Por último, para sintetizar las peculiaridades climáticas de cada uno de los 10 años de estudio y mostrar sus similitudes, se ha realizado un ACP basado en la matriz de correlaciones de: PR, los índices fitoclimáticos de Martonne, Emberger, Phillipis, Baudiere, Giacobbe y Vernet y parámetros descriptivos de las sequías estival (A, PE, A/PE y el número de días secos consecutivos). El diagrama de ordenación obtenido (Figura I-3) separa los años 1998 y 2003 por presentar un período seco severo y muy prolongado (A/PE y A elevados, primer cuadrante), mientras que los años 1996 y 2002 se ubican en el segundo cuadrante, atendiendo a la leve sequía estival que presentaron (valores bajos para los índices de aridez de Martonne y Emberger).

TASAS DE CRECIMIENTO EN PERÍMETRO DEL PINO CARRASCO

Al principio del seguimiento del crecimiento en grosor (en abril de 1995) el diámetro promedio de los árboles estudiados era de $2,23 \pm 0,42$ cm en la ladera S ($n=5$), y de $2,70 \pm 0,60$ cm en la N ($n=5$), mientras que a finales del 2002, el diámetro promedio era de $8,23 \pm 0,93$ cm y $7,65 \pm 1,94$ cm en la ladera N y en la S, respectivamente. De manera que el incremento anual en diámetro ha sido en

promedio de 0,77 y 0,79 mm en la ladera S y N, respectivamente (Tabla I-2 y Figura I-4C). A pesar de la desigualdad en el tamaño de los árboles según la ladera (Tabla I-2), no se han encontrado diferencias significativas (comparación de medias en el test t-student) en sus tasas de crecimiento medias anuales ni tampoco en las tasas máximas de crecimiento en perímetro ($0,36 \pm 0,08$ y $0,36 \pm 0,13$ mm día en la ladera N y S, respectivamente). No obstante, los árboles que crecen en la ladera N suelen alcanzar incrementos mayores que los de la ladera S, excepto en los años con mayor disponibilidad hídrica en primavera y verano (por ejemplo, en los años 2001 y 2002).

La figura I-4B muestra la evolución en las tasas medias de crecimiento en perímetro de cada ladera durante todo el período de estudio. Se observa que en la mayoría de los años el pino carrasco presenta dos máximos de crecimiento. El primero y más elevado, en primavera (mayo) y el segundo, en otoño (octubre). No obstante, existen algunas desviaciones de este patrón general según las condiciones climáticas de cada año. En 1997, el pico de crecimiento de otoño fue inexistente en la mayoría de árboles de ambas laderas; y en 1998, el máximo de primavera solamente ocurrió en los árboles que crecen en la ladera N.

LADERA NORTE									
Árbol	Orient. (°)	Pdte. (°)	Diám.(cm)	Tasa máx. (mm/día)	Alt.	Vol. copa (m ³)	Afloram. (%)	H arbust. (m)	Cobertura arbustos (%)
Ph-6	20	21	9,65	0,442	5,75	12,81	0,00	1,23	10,16
Ph-7	20	23	8,55	0,414	4,57	8,16	12,25	0,79	5,47
Ph-8	360	25	8,00	0,380	3,23	4,94	43,75	0,7	5,47
Ph-9	20	23	7,69	0,312	4,31	7,13	31,25	1,48	10,94
Ph-10	360	25	7,25	0,250	3,28	3,22	50,00	0,72	7,81
Media	12,00	23,40	8,23	0,36	4,23	7,25	27,50	0,99	7,97
STD	10,95	1,67	0,93	0,08	1,04	3,65	21,01	0,34	2,56

LADERA SUR									
Árbol	Orient. (°)	Pdte. (°)	Diám.(cm)	Tasa máx. (mm/día)	Alt.	Vol. copa (m ³)	Afloram. (%)	H arbust. (m)	Cobertura arbustos (%)
Ph-1	220	23	9,47	0,398	5,11	15,70	12,50	1,34	17,19
Ph-2	240	26	5,14	0,166	1,65	1,09	93,75	0,20	0,78
Ph-3	240	24	6,18	0,281	2,97	1,93	31,25	0,71	13,28
Ph-4	240	28	9,40	0,513	2,35	1,78	50,00	0,50	7,03
Ph-5	230	29	8,06	0,429	2,71	3,03	68,75	0,92	15,63
Media	234,00	26,00	7,65	0,36	2,96	4,71	51,25	0,73	10,78
STD	8,94	2,55	1,94	0,13	1,30	6,19	31,68	0,43	6,80

Tabla I-2. Características de cada árbol en el año 2002 Garraf. Abreviaciones: Orient., orientación del árbol; Pdte., pendiente; Diám., diámetro del árbol a la altura del dendrómetro; Tasa máx., tasa máxima de incremento en perímetro; Alt., altura del árbol; Vol. copa, volumen de la copa, Afloram., porcentaje de afloramiento rocoso alrededor del árbol; y H arbust., altura media de la vegetación arbustiva en un radio de 1 m, alrededor del árbol.

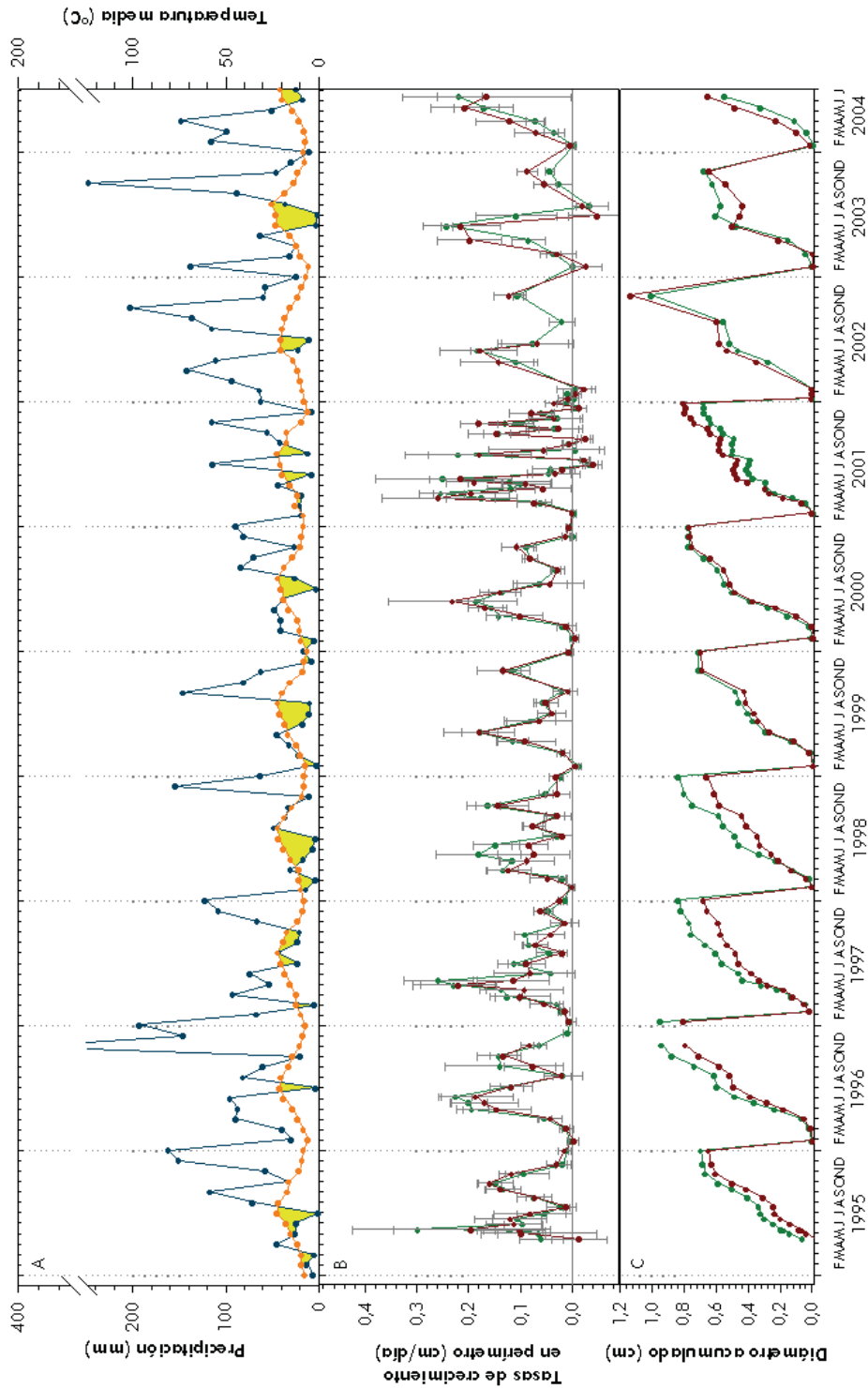


Figura 1.4. A. Precipitación acumulada (círculos azules) y temperatura media (círculos naranjas) calculados entre pares de días de muestreo consecutivos en Begues (Garraf). El área en la que $PR < 2 \cdot TM$ (período seco) se ha destacado en amarillo oscuro B. Tasas de crecimiento en perímetro del tronco (media y desviación estándar) de los árboles de la ladera N (círculos verdes) y de la ladera S (círculos rojos). C. Diámetro medio estandarizado (cm) de los árboles de las laderas N y S (círculos verdes y rojos, respectivamente).

La figura I-4B también pone de manifiesto la menor concordancia en el crecimiento entre laderas y la mayor varianza dentro de cada ladera cuando la disponibilidad hídrica es menor. En los períodos más secos, como por ejemplo la primavera de 1998 (Figura I-4A), los pinos de la ladera N presentaron tasas de crecimiento mayores que los de la S, mientras que cuando los recursos hídricos han sido más abundantes durante todo el año (como ocurrió en el 2001 y 2002), los árboles de la ladera S han crecido más que los de la N. En la figura I-4B también destaca la elevada varianza dentro de cada ladera a lo largo de todo el período estudiado, sobretudo en la S, motivo por el cuál se ha contrastado la homogeneidad en las series individuales. Posibles fuentes de dicha variabilidad son: la elevada heterogeneidad de condiciones microambientales (que es mucho mayor en la ladera S en relación al porcentaje de afloramientos rocosos y a la cobertura del sotobosque; Tabla I-2), las diferencias genéticas entre árboles o en la historia de cada individuo y el régimen de perturbaciones individual de cada árbol (ataques de insectos -como por ej. la procesionaria-, heridas, etc.).

La mayor variabilidad en las tasas de crecimiento el año 2001 (Figura I-4B) muy probablemente se deba al aumento en la frecuencia de muestreo. No obstante, el patrón de crecimiento obtenido recalculando las tasas de crecimiento en perímetro con la misma frecuencia de muestreo que el resto de años es muy similar (Figura I-5). De esta manera, se pone de manifiesto que al aumentar la frecuencia de muestreo de los dendrómetros aumenta la variabilidad en las tasas de crecimiento en perímetro. A pesar de ello, con una periodicidad quincenal de medición de los dendrómetros, las series de las tasas de crecimiento en perímetro todavía ilustran el patrón de crecimiento radial del pino carrasco en la localidad de estudio (Garraf). Probablemente, al aumentar la frecuencia de las mediciones de los dendrómetros, adquiere más importancia el factor hidratación/

deshidratación de la madera (incrementos reversibles del tronco), el cual altera en mayor grado el registro del crecimiento propiamente dicho.

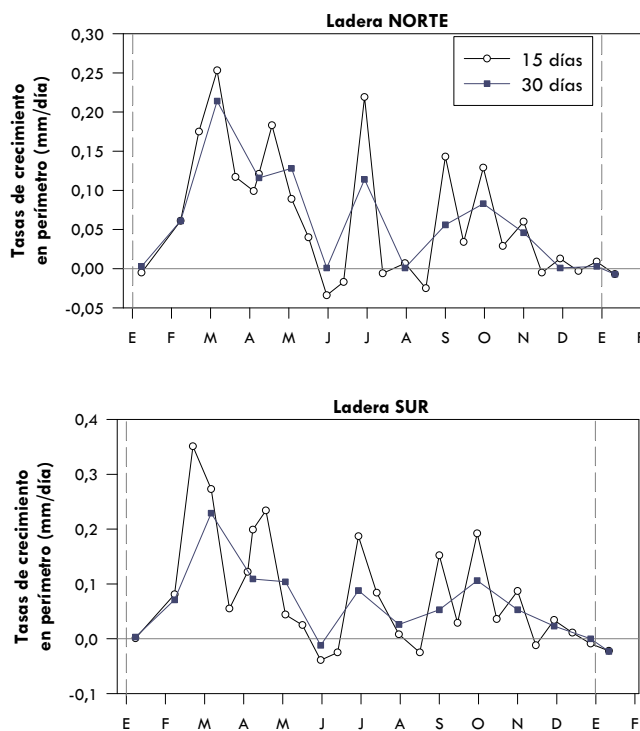


Figura I-5. Tasa media de crecimiento en perímetro del tronco calculada por períodos de muestreo de distinta frecuencia en las laderas N y S en Begues (Garraf) en el año 2001.

VARIABILIDAD EN LAS TASAS DE CRECIMIENTO

Tal y como muestra la tabla I-2, las características estructurales y del entorno inmediato de los árboles estudiados no son estrictamente homogéneas; ni entre laderas, ni dentro de cada una de ellas. Con el fin de comprobar la sincronía en las tasas de crecimiento, se ha realizado un análisis de correlaciones de Spearman (r_s) y un análisis de componentes principales (ACP).

Las series de las tasas de crecimiento en perímetro de los 10 individuos de pino carrasco presentan r_s elevados y significativos ($p < 0,01$; $n = 113$ observaciones desde abril de 1995 hasta julio del 2004). Las correlaciones son, en promedio, más elevadas entre los árboles de la ladera N ($0,799 \pm 0,050$) que entre los de la ladera S ($0,785 \pm 0,075$), y la correlación media entre ambas laderas es la más baja ($0,754 \pm 0,069$). Posiblemente, la mayor correlación en las tasas de crecimiento dentro de la ladera N se deba a las menores diferencias en la disponibilidad hídrica entre los árboles de esta ladera a causa de la mayor homogeneidad en el sustrato y en la cobertura del estrato arbustivo (Tabla I-2). No obstante, no se han encontrado diferencias significativas en las tasas de crecimiento entre laderas.

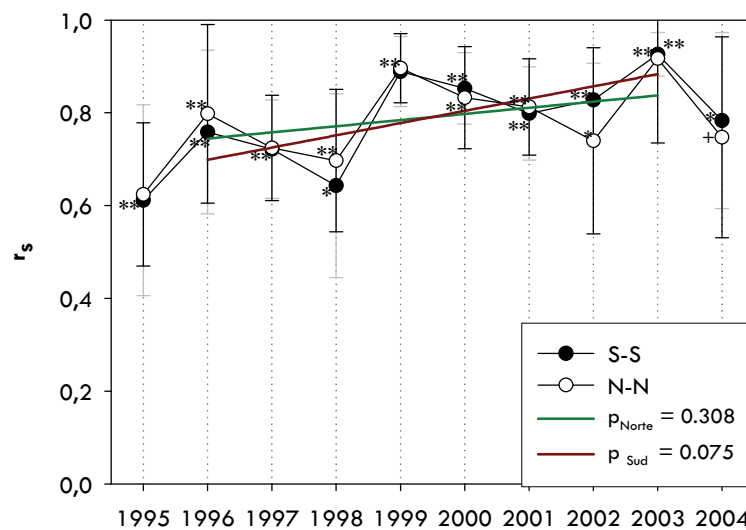


Figura I-6. Coeficiente de correlación de Spearman (r_s , promedio anual y desviación estándar) calculado entre las tasas de crecimiento en perímetro de los 5 árboles que crecen en la ladera N (N-N), entre los cinco de la ladera S (S-S) y entre todos ellos (N-S), desde el año 1995 hasta el 2004. La significación viene indicada con: ** si $p = 0,01$; * si $p = 0,05$ y + si $p = 0,10$. Las líneas verde y roja son los ajustes lineales realizados para la ladera N y S, respectivamente.

El análisis de correlaciones realizado para cada año (Figura I-6) muestra que la sincronía en las tasas de crecimiento ha sido muy elevada a lo largo de todo el seguimiento entre los distintos árboles. Los coeficientes de correlación son todos

significativos ($p \leq 0,05$), excepto para los árboles de la ladera N en el año 2004 ($p \leq 0,10$) posiblemente debido a la menor cantidad de datos ($n=5$, es un año de registro incompleto). El primer año del seguimiento (1995) presenta las correlaciones más bajas en los tres casos (N-N, N-S y S-S), probablemente como consecuencia de la distinta respuesta de los árboles a la instalación de los dendrómetros (Keeland y Sharitz 1993). No obstante, sin considerar los dos años de registro incompleto (1995 y 2004), se ha detectado una tendencia ascendente (pero no significativa) en la sincronía en el crecimiento de los árboles en ambas laderas (Figura I-6). Cabe destacar que el año en el que se han obtenido r_s mayores es el más seco y cálido (2003), mientras que en 1998, año en el que el período seco fue más duradero (220 días, Figura I-6), los r_s son menores. Sin embargo, no se ha encontrado ninguna relación significativa entre la duración y/o severidad de la sequía y el grado de sincronía entre árboles reflejado en los coeficientes de correlación. Atribuimos estos resultados a la enorme variabilidad y tipos de sequías.

Las plantas pueden clasificarse en dos tipos atendiendo a su estrategia para sobrevivir a la falta de agua: las que "evitan" la sequía (*drought-avoiding*) y las que la "soportan" (*drought-tolerant*). En las primeras, como *P. halepensis*, la asimilación de carbono se detiene durante los períodos de déficit hídrico debido al cierre de los estomas (Martínez-Ferri *et al.* 2000), hecho que queda reflejado en la acusada disminución de las tasas de crecimiento radial durante el verano (Figuras I-4 y I-8). En la localidad de estudio, el período seco suele verse atenuado por esporádicas y poco cuantiosas lluvias, a las cuales el pino carrasco probablemente responde de forma inmediata atendiendo a su condición de especie *drought-avoiding*. Esta respuesta inmediata ha sido previamente documentada Lipshchitz y Lev-Yadun (1986), y más recientemente por Nicault (2001). En este sentido, Borghetti *et al.* (1998) consideran que la reducción de la transpiración mediante el cierre de estomas como mecanismo para evitar el embolismo del xilema cuando hay sequía es una respuesta "elástica" de las plantas, mientras que la reducción en la transpiración causada por cambios en los patrones de alocaión de carbono (*drought-tolerant*) sería una respuesta de aclimatación "plástica".

El diagrama de ordenación obtenido en el ACP se muestra en la figura I-7A ($n=95$). Los resultados obtenidos en el ACP y en el análisis de correlaciones muestran que, a pesar de la gran variabilidad en las condiciones climáticas de los años de estudio, ha habido una gran sincronización entre el crecimiento de los distintos árboles y laderas. El primer componente (CP-I) explica un 73,8% de la variabilidad en las tasas de crecimiento, mientras que el segundo y tercero (componentes no significativos) explican, respectivamente, un 9,6% y 3,7%. Puesto que todos los árboles presentan correlaciones positivas con el CP-I, interpretamos este eje como un componente que describe la sincronía en las tasas de crecimiento entre árboles, o dicho de otro modo, la variabilidad en el patrón de crecimiento común a todos los árboles. Resultado que indica que este eje de ordenación está relacionado con un factor clave para la sincronía y variabilidad en el crecimiento radial de los distintos árboles, como es el clima (Tardif *et al.* 2003). De hecho, durante el período de crecimiento, la disponibilidad de agua se considera el principal factor limitante en las regiones mediterráneas (Oliveira *et al.* 1994, Boreux *et al.* 1998, Costa *et al.* 1998, Caritat *et al.* 2000), y numerosos estudios lo

constatan así para el pino carrasco (Serré 1976, Schiller y Cohen 1995, Smith y Hinckley 1995, Borghetti *et al.* 1998, Nicault 1999, Raventós *et al.* 2001, Ferrio *et al.* 2003).

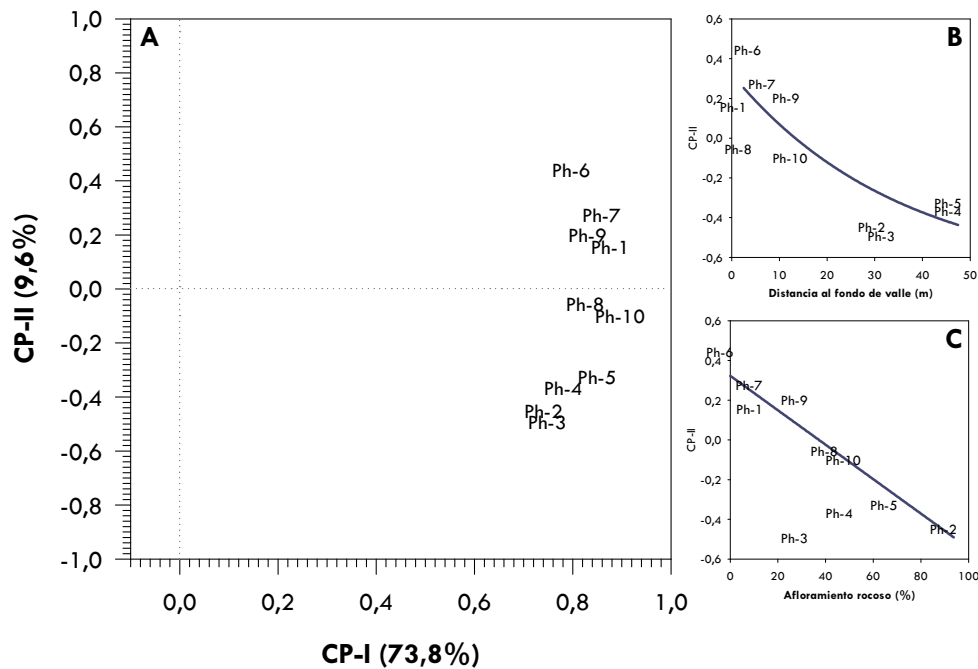


Figura I-7. A. Diagrama de ordenación del ACP, basado en la covarianza entre las tasas de crecimiento en perímetro de los 10 individuos estudiados. Del Ph1 al Ph5 en la ladera N y, del Ph6 al Ph10 en la S. B. Relación entre las puntuaciones de cada árbol para el CP-II y la distancia de cada árbol al fondo del valle. C. Relación entre las puntuaciones de cada árbol para el CP-II del ACP y el porcentaje de afloramiento rocoso alrededor (en un área de 1 m de radio) del árbol.

El segundo componente, en cambio, separa los pinos de manera que los de la ladera N presentan valores positivos y los de la ladera S, negativos. No obstante, hay dos árboles que se sitúan con los de la ladera opuesta (el Ph-1, situado en la ladera S, y el Ph-8, que está en la N). Este resultado no es tan extraño si atendemos a las características y hábitat de estos dos individuos (Tabla I-2). El Ph-1 es el árbol más grande de la ladera S, también es el que se encuentra más cerca del fondo del valle, está rodeado de coscoja (*Quercus coccifera*) y situado sobre suelo abundante con pocos afloramientos de roca madre. En cambio, el Ph-8 está situado sobre sustrato rocoso y con poca vegetación arbustiva a su alrededor. Por todo ello, interpretamos el segundo componente, como el conjunto de condiciones ambientales (sustrato, protección de la vegetación arbustiva, proximidad al fondo del valle, exposición al viento, etc.) que afectan el crecimiento del pino carrasco en la localidad de estudio. De esta manera, el segundo eje de ordenación (CP-II), a pesar de no ser significativo, pone de manifiesto la importancia del microhábitat como modulador del patrón de las tasas de crecimiento radial.

En la figura I-7B puede observarse que existe una relación exponencial negativa entre los valores obtenidos para el CP-II de cada árbol y la distancia de éstos al fondo de valle ($r^2=0,82$, $n=10$, $p<0,02$). Del mismo modo, la relación entre los valores de cada árbol para el CP-II y el porcentaje de afloramiento de roca madre alrededor del árbol es lineal ($r^2=0,85$, $n=10$, $p<0,002$, Figura I-7C). La relación entre ambas variables ambientales (distancia al fondo de valle y porcentaje de afloramiento rocoso) es exponencial positiva ($r^2=0,44$, $n=10$, $p<0,036$). La retención de agua es inferior en los suelos con elevados porcentajes de afloramientos de roca, especialmente en terrenos de tipo calcáreo. Por lo tanto, las diferencias en las tasas de crecimiento radial entre árboles causadas por la distinta capacidad de retención de agua del suelo (condiciones microambientales) son notables en la localidad de estudio. Resultados similares se han obtenido en otros trabajos (Gindel 1964, Serré 1976, Schiller 1982, Liphschitz y Lev-Yadun 1986, Oliveira *et al.* 1994, Boreux *et al.* 1998, Nicault 1999, Caritat *et al.* 2000) indicando que la disponibilidad de agua en el suelo limita el crecimiento radial del pino carrasco y sus dimensiones (Figura I-7C).

PERÍODO Y PATRÓN DE CRECIMIENTO RADIAL

A pesar de la gran variabilidad interanual en las condiciones climáticas (y por tanto en las tasas de crecimiento) se ha podido extraer el patrón de crecimiento radial del pino carrasco en la localidad de estudio poniendo de manifiesto lo que Oliveira (1994) y Montenegro (1987) afirmaban: "la variación estacional de las precipitaciones y temperaturas en el clima mediterráneo genera un patrón de actividad en el crecimiento con un ciclo estacional bastante claro". Dicho patrón es bimodal, empieza en febrero y termina en noviembre-diciembre; la tasa máxima de crecimiento se produce en mayo, y el segundo máximo, en octubre.

Los resultados obtenidos en relación al patrón y período de crecimiento del pino carrasco en el Garraf se presentan en la figura I-8A (ladera N) y figura I-8B (ladera S). La figura I-8C muestra las funciones ajustadas en ambas laderas para facilitar su comparación. En estas figuras se han representado todas las tasas de crecimiento en perímetro del registro de 10 años, como si hubieran tenido lugar en un mismo año mediante el empleo de los días julianos. El patrón de crecimiento se ha obtenido mediante el ajuste de un polinomio de grado 6 a las tasas de crecimiento máximas (contorno superior) y mínimas (contorno inferior). Dicho análisis se realizó para cada ladera por separado para resaltar similitudes y diferencias entre ambas. Consideramos que el ajuste superior describe el patrón de crecimiento radial cuando las condiciones han sido favorables; y el ajuste inferior, cuando las condiciones han limitado más el crecimiento del pino carrasco en la localidad estudiada. La separación entre estos dos ajustes, muestra las grandes diferencias que pueden producirse en un mismo momento del año según sean las condiciones ambientales y, en especial, a la disponibilidad hídrica (atendiendo a los resultados obtenidos en el análisis del efecto de las condiciones climáticas sobre el crecimiento radial).

En la ladera N, el crecimiento radial del pino carrasco empieza a principios o mediados de febrero, según sean las condiciones climáticas (Figura I-4 y I-8A). Sus tasas de crecimiento ascienden rápidamente hasta llegar a su máximo a

principios de mayo de 0,23 mm/día si las condiciones son favorables y de 0,08 mm/día, si son adversas. A continuación, descienden hasta el mínimo entre 0,07 mm/día (condiciones óptimas) y 0,01 mm/día (condiciones adversas) durante la primera semana de agosto, y vuelven a aumentar, alcanzando el segundo máximo de crecimiento a mediados de octubre (0,08 mm/día bajo condiciones desfavorables y 0,14 mm/día si las condiciones son óptimas). Finalmente, las tasas de crecimiento disminuyen de forma acusada hasta pararse por completo a finales de noviembre o principios de diciembre.

El patrón de crecimiento de los pinos de la ladera S (Figura I-8B), es muy parecido al de los de la N, aunque hay diferencias en las tasas máximas y mínimas, y en la duración del período de crecimiento. Las tasas máximas primaverales de los árboles de la ladera S son casi iguales y sincrónicas a las de los árboles de la ladera N, aunque ligeramente inferiores tanto si las condiciones son favorables (0,21 mm/día) como si son adversas (0,07 mm/día bajo). El mínimo anual se produce simultáneamente al de la ladera N (principios de agosto) y es muy parecido cuando las condiciones son favorables (0,07 mm/día). La mayor diferencia entre laderas es que los pinos que crecen en la ladera S llegan a detener su crecimiento radial entre principios de julio y medianos de agosto cuando las condiciones son adversas (Figura I-4 y I-8), mientras que en la ladera N tan sólo lo detienen en los años más secos, como por ejemplo en el 2003 (Figura I-1B). Resultados similares obtuvieron Serré (1976) y Nicault (1999) en el sur de Francia, y Papadopoulos *et al.* (2001) en Grecia. Un caso extremo lo encontramos en Israel, dónde el pino carrasco detiene o prácticamente no presenta actividad durante casi 8 meses (desde principios de primavera hasta finales de otoño) como consecuencia del severo estrés hídrico (Schiller y Cohen 1998).

Otra diferencia entre laderas es que los pinos de la ladera S presentan las tasas máximas de otoño menores (0,05 mm/día) que los de la ladera N (0,08 mm/día) cuando las condiciones climáticas son estresantes, y en general lo presentan una semana más tarde. Finalmente, el cese del crecimiento radial tiene lugar de forma simultánea cuando las condiciones no son favorables para el crecimiento, pero cuando éstas son propicias, los pinos de la ladera S alargan su período de crecimiento hasta tres semanas (terminando a mediados o finales de diciembre), posiblemente debido a las elevadas temperaturas en las laderas con exposición S por la mayor insolación. Estos resultados ponen de manifiesto que la menor disponibilidad hídrica en la ladera S, limita el crecimiento radial de los árboles cuando las condiciones son adversas pero sin embargo en los años con disponibilidad hídrica suficiente, las temperaturas más elevadas en la ladera S, permiten un mayor crecimiento anual posiblemente a causa de las más elevadas tasas de crecimiento y del alargamiento del período de crecimiento.

El hecho que los patrones de crecimiento en ambas laderas sean muy similares al principio de la estación de crecimiento, independientemente de si las condiciones climáticas son favorables o no para el crecimiento (Figura I-8C), nos conduce a pensar que la recarga hídrica del suelo durante los meses de invierno puede ser importante en la determinación de las tasas de crecimiento en febrero y marzo. No obstante, en la localidad de estudio, el suelo presenta una capacidad de retención de agua muy baja por la naturaleza cárstica del macizo (Abril 1987).

Podría ser que *P. halepensis* utilizará agua almacenada en sus raíces tal y como se apunta en la bibliografía (Schiller y Cohen 1995, Borghetti *et al.* 1998, Schiller *et al.* 2000).

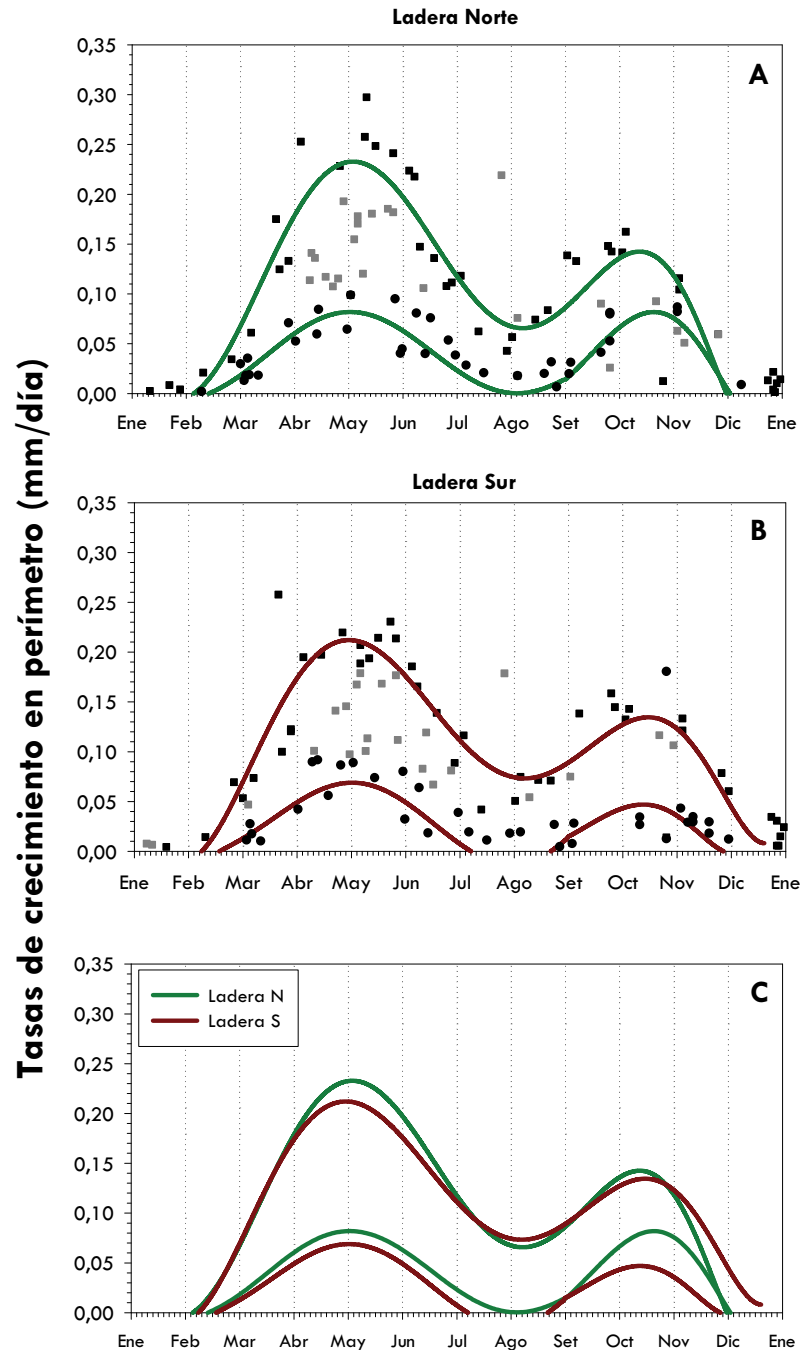


Figura 1-8. Tasas de crecimiento en perímetro registradas desde 1995 hasta el 2004 ($n=113$) y su patrón de crecimiento medio, cuando las condiciones son favorables (ajuste al entorno superior y cuadrados negros), y cuando son adversas (ajuste entorno inferior y círculos negros) en la ladera N (A), y en la ladera S (B), y en ambas laderas simultáneamente, para facilitar su comparación (C).

CONTROL DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO EN PERÍMETRO

Las funciones respuesta obtenidas con las tasas de crecimiento en perímetro de cada ladera son significativas ($p \leq 0,05$) y similares (Figura I-9). La evolución anual de los coeficientes de regresión parciales indica que hay un claro efecto significativo y positivo del fotoperíodo y de la radiación solar incidente (RS) desde febrero hasta mediados de marzo. Durante este período, y hasta mediados de abril, la temperatura media también ejerce un efecto significativo y positivo sobre el crecimiento. Estos resultados nos conducen a pensar que existe un doble mecanismo (insolación y TM) de regulación del inicio del período de crecimiento del tronco del pino carrasco.

Desde junio hasta octubre, la precipitación (PR) mantiene un efecto positivo sobre las tasas de crecimiento, mientras que la temperatura afecta negativamente el crecimiento. El efecto negativo de las elevadas temperaturas sobre el crecimiento puede atribuirse al estrés hídrico (Oberhuber *et al.* 1998, Liang *et al.* 2001). Esta relación sugiere que la mayor demanda hídrica de la vegetación por el aumento en la respiración causado por las elevadas temperaturas (Dougherty *et al.* 1994), acentúa el déficit de presión de vapor de agua; y como consecuencia, se inhibe el crecimiento (Rolland 1993).

Las variables que más condicionan las tasas de crecimiento en perímetro al final del período de crecimiento son la duración del día, PR y TM. Pero, el índice de aridez $PR/2 \cdot TM$, es la única de las variables consideradas que presenta una relación significativa con las tasas de crecimiento en perímetro, especialmente en la ladera S. Los resultados obtenidos están de acuerdo con los de Greber y Chaloner (1990), quienes concluyeron que la influencia de la temperatura del aire sobre el cese e inicio de la actividad del cámbium es notable. La relación entre las tasas de crecimiento en perímetro y PR/ET_0 tan sólo es significativa en septiembre y octubre, mientras que $PR/2 \cdot TM$ mantiene su efecto significativo y positivo desde julio hasta mediados de septiembre, así como a finales del período de crecimiento. El hecho que el cociente $PR/2 \cdot TM$ se relacione de forma más significativa y durante más tiempo con el crecimiento que el índice P/ET_0 (Figura I-9), nos conduce a pensar que el crecimiento del pino carrasco, no sólo está limitado de forma indirecta por las temperaturas, sino que, probablemente, éstas influyan también directamente sobre él. Además, la principal diferencia detectada entre laderas (en el análisis de las relaciones crecimiento-clima) es que los pinos de la ladera S están más limitados por PR y $PR/2 \cdot TM$ que los de la ladera N (Figura I-9); en concordancia con las diferencias encontradas en el patrón de crecimiento de cada ladera (Figura I-8).

La relación entre TM y las tasas de crecimiento viene descrita por una función Log-Normal de 3 parámetros ($p \leq 0,0001$). Esta relación es muy similar en ambas laderas (N y S; Figura I-10). Las funciones ajustadas indican que existe un umbral térmico ($7,65^\circ \text{C}$), que debe superarse para poder detectar incrementos en el tronco del pino carrasco en ambas laderas. Una vez superado dicho umbral, las tasas de crecimiento aumentan hasta alcanzar su máximo cuando TM es de 14°C . Para valores de TM superiores, las tasas de crecimiento disminuyen gradualmente.

La mayor dispersión de puntos pasados los 9°C , sugiere que a partir de esta temperatura, otros factores ambientales controlan, junto con la TM, el crecimiento radial del pino carrasco (como por ejemplo, la falta de agua en verano, cuando las temperaturas son más elevadas). No se han encontrado diferencias significativas en el óptimo térmico, ni en los máximos de crecimiento entre laderas.

Estos resultados constatan que el clima ejerce una fuerte influencia sobre el crecimiento radial del pino carrasco no sólo mediante la limitación del mismo por la falta de agua, sino también a través de un umbral fisiológico de temperatura. En este sentido, Foster y LeBlanc (1993) constatan que la respuesta de los árboles a los fenómenos climáticos que acontecen a escalas temporales diversas (desde segundos hasta días) llevan implícitos umbrales que se corresponden con el proceso fisiológico que desencadenan.

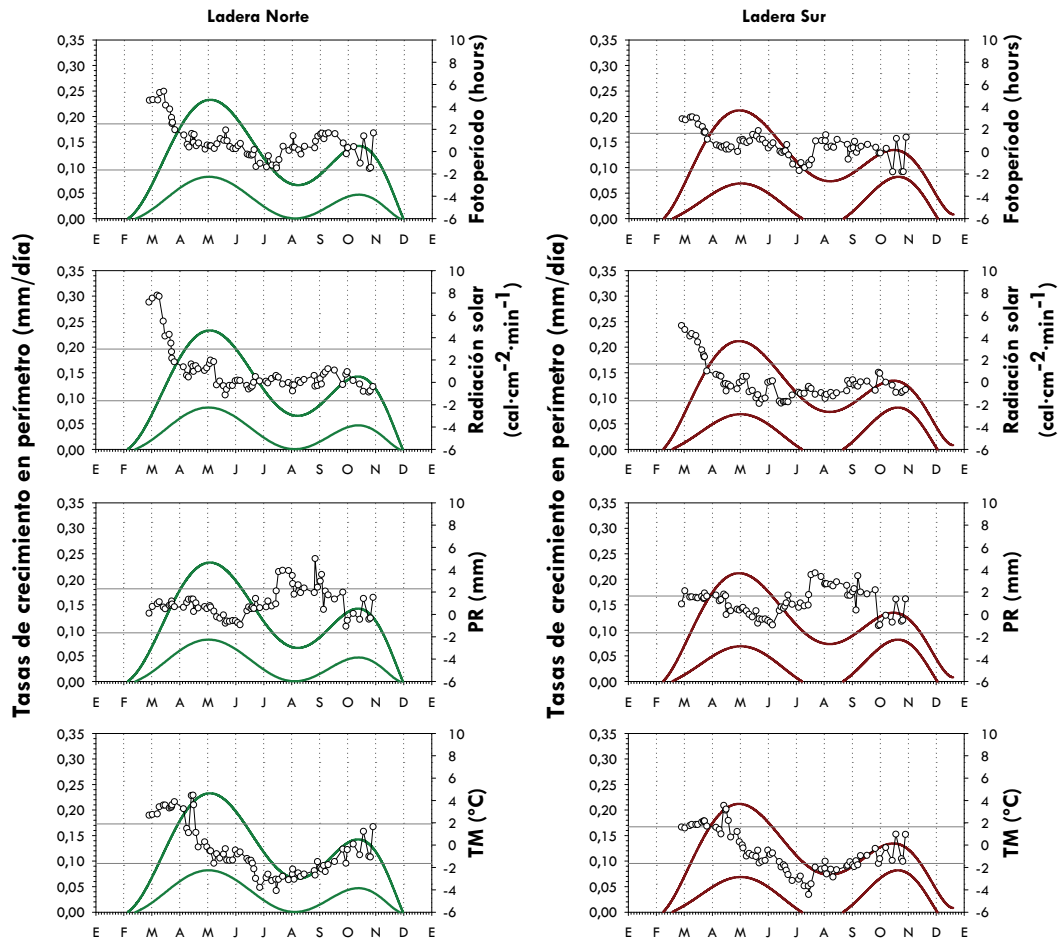


Figura 1-9.1. Cicientes de regresión parcial de las funciones respuesta móviles representados por círculos ($n=30$ datos con desplazamiento de uno) a lo largo del año para los pinos de la ladera N y para los de la S. Para más detalles, véase metodología. Las líneas horizontales indican el rango que corresponde a un 90% de confianza. Todas las funciones respuesta obtenidas son significativas con $p \leq 0,05$.

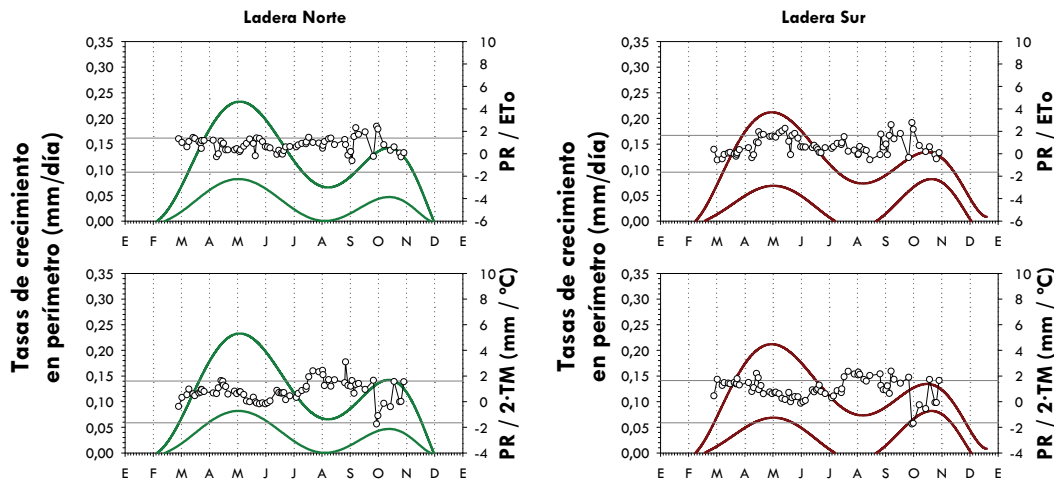


Figura I-9.2. Cocientes de regresión parcial de las funciones respuesta móviles representados por círculos ($n=30$ datos con desplazamiento de uno) a lo largo del año para los pinos de la ladera N y para los de la S. Para más detalles, véase metodología. Las líneas horizontales indican el rango que corresponde a un 90% de confianza. Todas las funciones respuesta obtenidas son significativas con $p \leq 0,05$.

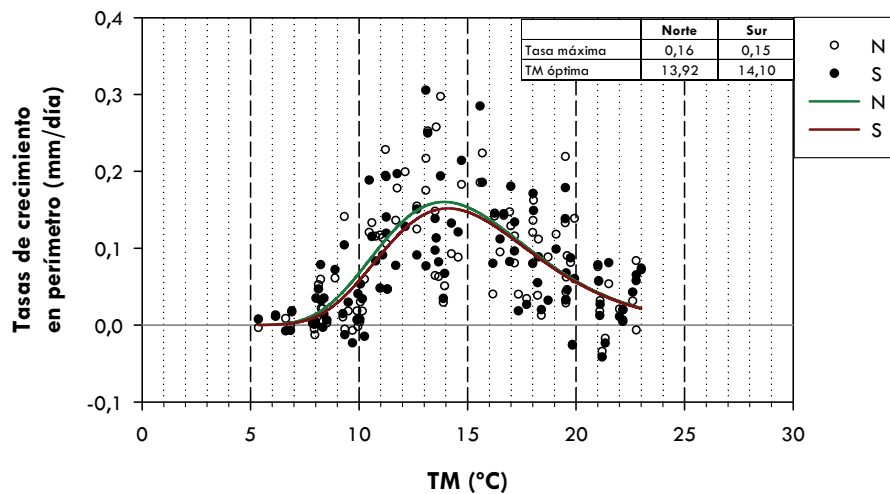


Figura I-10. Relación entre la temperatura media (TM) calculada entre pares de días de muestreo consecutivos, y las tasas de crecimiento en perímetro registradas en cada ladera ($p < 0,0001$).

FORMACIÓN DEL ANILLO DE CRECIMIENTO Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Son diversos los trabajos en los que se subraya la dificultad de datar con fiabilidad los anillos de crecimiento en las especies mediterráneas a causa de la elevada frecuencia de anillos dobles o falsos (Cherubini *et al.* 2003). No obstante, mediante el análisis de las series de crecimiento radial obtenidas con los dendrómetros se ha podido establecer el período y patrón de crecimiento del pino

carrasco en el Garraf y su relación con las condiciones climáticas. En este apartado se muestra la relación entre las tasas de crecimiento en perímetro, las condiciones climáticas y la anatomía de los anillos de crecimiento a nivel celular. Para ilustrar las relaciones existentes, se ha seleccionado el año 2001 por ser cuando las medidas del grosor del tronco se realizaron con mayor constancia (exactamente cada 15 días) y por coincidir con un año en el que la sequía estival fue interrumpida por unas abundantes lluvias en el mes de julio (Figura I-1), fenómeno relativamente poco frecuente en el área de estudio. En concreto, cayeron 113,27 mm de agua entre el 15 y el 19 de julio, cuando el último día con precipitaciones notables (más de 10 mm) había sido el 5 de mayo, y no volvió a llover hasta el 30 de agosto (10,15 mm).

En la parte superior de la figura I-11 puede verse un corte histológico en el que se visualiza el anillo de crecimiento del año 2001 (indicado con la flecha verde) de uno de los árboles de la localidad de estudio (Garraf). En la tinción utilizada, la celulosa (células del cámbium y paredes celulares de las células vivas) se tiñen de azul (azul astra), mientras que la lignina (traqueidas maduras o en proceso de lignificación), se tiñe de rosa (safranina). En el anillo del 2001 destacan tres franjas más densas (dos intraanuales y la que delimita el final del anillo de crecimiento) que se corresponden con células en las que se ha engrosado la pared celular y, debido a ello, aparecen cambios en la densidad de la madera (IADF, fluctuaciones intraanuales de la densidad). De esta manera, el crecimiento del año 2001 podría confundirse con tres crecimientos distintos; dicho de otro modo, podría interpretarse que cada uno de estos cambios de densidad se corresponde con el final de un anillo de crecimiento anual. No obstante, atendiendo al tamaño de las células, se observa que en los dos cambios de densidad intraanuales, éste se mantiene constante, mientras que, en el último cambio de densidad (el que se corresponde con la finalización del período de crecimiento), el tamaño de las células disminuye gradualmente. Este resultado es coherente con el hecho que cuando la actividad del cámbium se reanuda, las células que se generan están poco lignificadas, presentando paredes celulares delgadas y lúmenes celulares amplios (Antonova y Stasova 1993).

La figura I-11, ilustra cómo estos IADF se corresponden con la detención de las tasas de crecimiento radial, y éstas, con la falta de agua. Es decir, existe una relación inversa entre la densidad de la madera y las tasas de crecimiento radial de manera que cuando la actividad del cámbium disminuye (tasas de crecimiento en perímetro más bajas), el período de lignificación de cada célula se alarga produciéndose un aumento local de la densidad. Por lo tanto, de acuerdo con Attolini *et al.* (1990), las oscilaciones en la densidad de la madera del pino carrasco, al ser consecuencia de las variaciones en la actividad del cámbium (tamaño celular y lignificación de las células), responden a los cambios ambientales y en especial a los períodos de sequía.

Los resultados obtenidos son muy similares en los árboles de ambas laderas (resultados no mostrados), Sin embargo, los cambios de densidad son más frecuentes y evidentes en los árboles de la ladera S (80% de las muestras, versus el 60% en las de la N) de acuerdo con la menor disponibilidad hídrica en la solana (mayor porcentaje de afloramientos rocosos y mayor insolación).

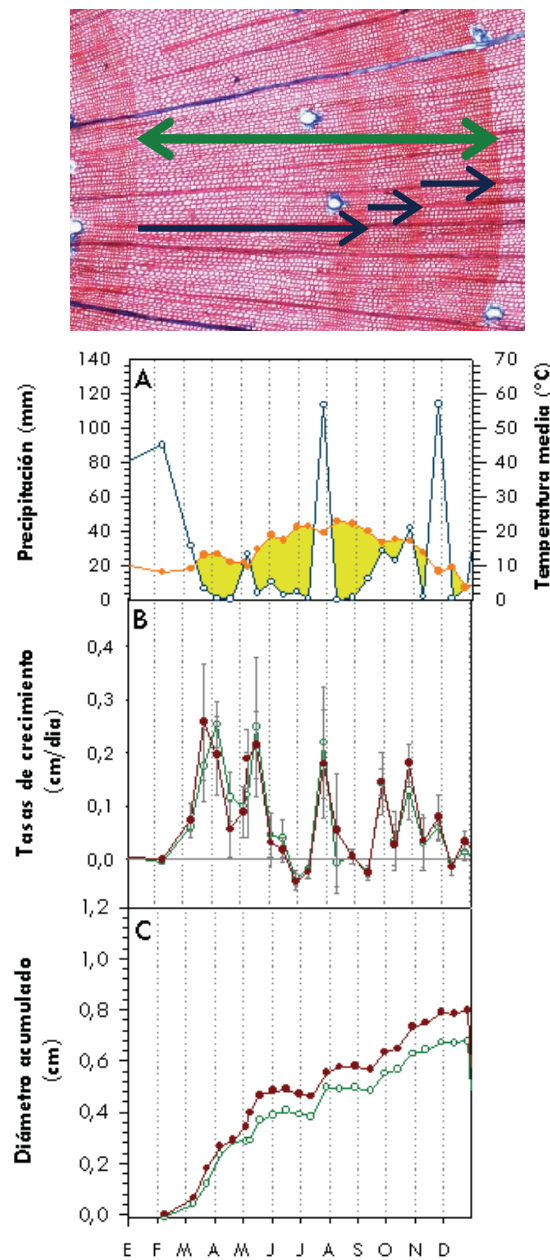


Figura I-11. Arriba, fotografía del corte histológico del anillo de crecimiento del año 2001 en Begues (Garraf). La flecha verde indica el grosor del anillo de crecimiento del año 2001 (crecimiento total anual), mientras que las flechas azules muestran el grosor de los tres falsos anillos creados durante el año. La muestra teñida, por Dendrix con safranina y azul astra, también muestra un radio medular y varios canales resiníferos (en azul). Abajo, **A.** Precipitación acumulada (círculos azules) y temperatura media (círculos naranjas) calculados entre pares de días de muestreo consecutivos en Begues (Garraf). **B.** Tasas de crecimiento en perímetro del tronco (media y desviación estándar) de los árboles de la ladera N (círculos verdes) y de la ladera S (círculos rojos). **C.** Diámetro medio estandarizado (cm) de los árboles de las laderas N y S.

SÍNTESIS

La zona de estudio (Garraf), presenta una elevada variabilidad climática intra e interanual. Este hecho ha quedado reflejado en la gran diversidad de condiciones climáticas registradas a lo largo del período de estudio (1995-2004); en especial, atendiendo a la pluviometría y su repartición anual.

A modo de resumen, en el año 2003 la sequía estival fue muy severa; en 1998 el período seco estival fue muy prolongado. En 1996 y 2002 las precipitaciones fueron bastante abundantes, de manera que el período seco fue muy corto y leve. El año 2001 se caracterizó por presentar lluvias especialmente cuantiosas durante el mes de julio que interrumpieron el período seco estival.

A pesar de la enorme variabilidad intraanual e interanual, se ha podido determinar el patrón bimodal del crecimiento radial del pino carrasco en la localidad del Garraf, el cual está estrechamente relacionado con el ciclo estacional de condiciones climáticas en la zona. Presenta, en general, dos máximos de crecimiento coincidentes con los dos máximos pluviométricos. El primero y más elevado, en primavera (mayo), y el segundo, en otoño (octubre). A pesar de ello, existen algunas desviaciones de este patrón general relacionadas con las condiciones climáticas de cada año.

Los resultados obtenidos constatan que el clima ejerce una fuerte influencia sobre el crecimiento radial del pino carrasco a través de un umbral fisiológico de temperatura ($7,65^{\circ}$ C de T_M) que determina el inicio del crecimiento radial. No obstante, también se ha detectado el efecto positivo y significativo que ejercen la radiación solar y el fotoperíodo sobre el crecimiento radial al principio de la estación de crecimiento. La existencia de esta doble regulación del inicio/fin del crecimiento podría sugerir que, en función de cuál de los dos mecanismos (temperatura o radiación) ejerza mayor influencia en la activación del crecimiento radial, dicho proceso se verá más o menos afectado en su calendario por el cambio climático, en particular por el aumento de las temperaturas. Por otro lado, la producción de madera del pino carrasco podría cambiar de forma acusada si disminuye la disponibilidad de agua, tanto en cantidad como en calidad (cambios en la densidad de la madera causados por las fluctuaciones en las tasas de crecimiento durante el verano, cuando falta agua).

El claro y marcado período de latencia invernal (enero), permite datar con fiabilidad los anillos de crecimiento de esta especie. Esta datación nos ofrece la posibilidad de realizar estudios dendroecológicos y dendroclimatológicos de *P. halepensis* en, al menos, el NE de la Península Ibérica. Durante el resto del año, el pino carrasco no parece tener períodos de latencia regulares: el crecimiento se detiene cuando las temperaturas y la disponibilidad hídrica llegan a ser prohibitivas, y se reinicia, tan pronto como devienen favorables. Esta plasticidad, acorde la estrategia "drought-avoiding" de la especie, permite el ajuste de sus tasas de crecimiento radial a las condiciones climáticas de cada momento. Además, su prolongada estación de crecimiento (desde febrero hasta diciembre), junto con su elevada sensibilidad, y la capacidad de adecuación de sus tasas de crecimiento a las condiciones climáticas intraanuales, conllevan a pensar que los anillos de

crecimiento de esta especie contienen la información de las condiciones ambientales que acontecen durante prácticamente todo el año.

Asimismo, los patrones de crecimiento de las dos laderas (N y S) son muy parecidos; sin embargo, se han detectado algunas diferencias en las tasas máximas y mínimas y en la duración del período de crecimiento que están estrechamente relacionadas con las condiciones climáticas. Las diferencias más destacables son:

- (I) Los pinos de la solana siempre detienen su crecimiento radial en verano, mientras que los de la umbría, sólo lo interrumpen durante los veranos más secos (por ej. el 2003).
- (II) El cese del crecimiento radial (al final de la estación de crecimiento) tiene lugar de forma simultánea en ambas laderas cuando las condiciones son limitantes para el crecimiento; mientras que cuando son favorables, los pinos de la ladera S alargan su período de crecimiento hasta tres semanas, terminando a mediados-finales de diciembre.

Si bien se ha mostrado que las condiciones climáticas determinan la sincronía en las tasas de crecimiento radial de los distintos árboles, también existen factores de segundo grado (como por ej. la capacidad de retención de agua del suelo) que modulan estas tasas, siendo una fuente de variabilidad importante en el crecimiento entre individuos. Estos resultados subrallan que en la localidad de estudio (Garraf) el principal limitante del crecimiento del pino carrasco es la disponibilidad de agua en el suelo.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el pino carrasco, a pesar de ser una especie muy bien adaptada a las condiciones climáticas de la región mediterránea occidental, presenta una gran capacidad de adaptación frente prolongadas condiciones hídricas desfavorables. En este sentido, podría tratarse de una de las especies arbóreas del mediterráneo más flexibles, y debido a ello, con gran capacidad para responder a los escenarios climáticos futuros de la cuenca mediterránea.