

**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 IV**

**Análisis espacio-temporal de las  
relaciones crecimiento-clima**



## INTRODUCCIÓN

La dendroclimatología es la disciplina que se ocupa de extraer la información climática que contienen los anillos de crecimiento, mediante el establecimiento de relaciones estadísticas entre las series dendrocronológicas y las climáticas (Fritts 1976). Esta disciplina, ha sido muy efectiva en el análisis de las relaciones ecológicas entre el crecimiento de los árboles y el clima (Cook y Kairiukstis 1990, Schweingruber 1996), demostrando ser muy útil para definir el rango de variabilidad de las relaciones crecimiento-clima en múltiples escalas temporales y espaciales (Swetnam *et al.* 1999, Briffa *et al.* 2002a, 2002b). En este sentido, son numerosos los trabajos dendroecológicos que demuestran que los árboles actúan como registros, los cuales integran las repercusiones que en ellos han tenido las variaciones anuales e intraanuales de los factores ambientales, ya sea a través de las series del grosor de los anillos de crecimiento; o de su composición química (Matthews 2002, Gagen y McCarroll 2004). Asimismo, los anillos de crecimiento, han aportado información climática continua con resolución anual o incluso inferior, y han sido una fuente importante de los llamados “*proxy-climate indicators*” (Hughes *et al.* 1992, Briffa *et al.* 1998b, Biondi 2000, Sheppard *et al.* 2004, Poivesan *et al.* 2005). En la Península ibérica son varios los trabajos dendroclimáticos realizados con la finalidad de reconstruir el clima (temperatura y precipitación) de los últimos tres-cuatro siglos (Fernández *et al.* 1996, Fernández-Cancio *et al.* 1997, Génova 2000) e, incluso del último milenio (Creus *et al.* 1997).

El crecimiento radial de los árboles es el resultado de la integración de distintos procesos fisiológicos, los cuales están estrechamente controlados por las condiciones climáticas (Bradley 1985); de manera que la temperatura y precipitación se correlacionan bien con el crecimiento (Lebourgeois *et al.* 2005). Al mismo tiempo, existen otros factores ecológicos de tipo no climático que, simultáneamente, afectan al crecimiento radial de los árboles, como son: la competencia (Veblen *et al.* 1991), las plagas de insectos desfoliadores (Swetnam *et al.* 1993) y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Sheppard *et al.* 2001). Efectivamente, las relaciones entre el clima y el crecimiento radial de los árboles no sólo conciernen al clima, sino también al conjunto de condiciones ambientales del lugar. Las características del sitio (topografía, naturaleza del sustrato, componentes y estructura del suelo, vegetación, etc.) actúan como moduladores del factor climático, de manera que pueden reducir o amplificar el efecto que los factores climáticos ejercen sobre el crecimiento de los árboles (Hughes *et al.* 1992, Schweingruber 1996, Papadopoulos *et al.* 2001). Consecuentemente, deviene fundamental para poder interpretar (de forma acertada) los resultados obtenidos en las relaciones crecimiento-clima, la selección y el conocimiento de las características del entorno de los árboles. En resumen, las series del grosor de los anillos de crecimiento son registros del crecimiento de los árboles en condiciones naturales que, convenientemente analizadas, pueden ser utilizadas para evaluar el impacto que los cambios en las condiciones climáticas pueden tener sobre el crecimiento (Keller 1999), el estado fitosanitario (Raventós *et al.* 2001) o la producción de los bosques (Rathgeber *et al.* 2000, Sabaté *et al.* 2002).

Los procedimientos más comúnmente utilizados para estudiar la relación

entre el crecimiento de los árboles y el clima se basan en correlaciones entre las series de crecimiento estandarizadas y los datos climáticos mensuales. De esta manera, se establecen relaciones estadísticas, denominadas funciones respuesta (FR), entre la variable dependiente (crecimiento) y un conjunto seleccionado de regresores (variables climáticas). Tal y como definen Hughes *et al.* (1992), las FR miden la efectividad de un modelo estadístico particular para predecir la variabilidad en las series de los anillos de crecimiento que los factores externos causan. En otras palabras, el objetivo principal de estos modelos empíricos es estimar la influencia media del clima sobre el crecimiento radial de los árboles y, más concretamente, determinar qué parámetros climáticos afectan el crecimiento del árbol, cómo lo hacen y cuándo. Por otro lado, las FR pueden utilizarse para simular cómo puede variar el crecimiento de los árboles en respuesta al cambio climático (Rathgeber *et al.* 2000).

El presente capítulo tiene como propósito general establecer cómo afectan las condiciones climáticas al crecimiento del pino carrasco. En él, se presentan los resultados más relevantes obtenidos en el análisis espacio-temporal de las relaciones crecimiento-clima, el cuál se ha realizado desde tres perspectivas distintas. En primer lugar, se ha evaluado qué variables climáticas restringen el crecimiento radial del pino carrasco en cada localidad de la red de cronologías a nivel local. Para ello, se han obtenido las FR que relacionan el crecimiento radial de cada población con las condiciones climáticas locales, es decir, las descritas por los registros meteorológicos del observatorio más cercano. Los resultados obtenidos han revelado que el crecimiento del pino carrasco está fuertemente determinado por el clima específico del lugar, sobretudo por las precipitaciones. A pesar de ello, se ha detectado que existe una gran similitud en la respuesta de determinados grupos de cronologías (poblaciones) al clima. Este resultado, nos ha conducido a analizar los efectos que ejerce el clima a escala regional sobre el crecimiento radial de *P. halepensis* en España. De estos resultados, también se extrae, de forma sintética, cómo varía su patrón de crecimiento radial dentro del amplio rango de condiciones climáticas, que se encuentran a lo largo de su área de distribución en España; las cuales derivan (tal y como se ha mostrado en el capítulo II) de la superposición de dos gradientes climáticos: uno, de continentalidad; y el otro, de aridez. Finalmente, se ha contrastado hasta qué punto, el componente regional detectado en el perfil de las FR puede ser debido a fenómenos de la circulación atmosférica a escala global.

La circulación atmosférica presenta una incesante variabilidad en todas las escalas temporales: desde horas (fenómenos mesoescalares, como tormentas o pasos de frentes) y días o semanas (configuraciones de bloqueo), hasta meses o incluso años (anomalías climáticas). Al estudiar las variaciones de baja frecuencia en la circulación atmosférica global, se han detectado modos de circulación (*teleconnection patterns* en la literatura anglosajona), que son identificables como persistentes anomalías de presión. Éstas, se extienden sobre grandes áreas geográficas y tienden a reproducirse en diferentes intervalos temporales. Entre los modos de circulación más conocidos destacan la Oscilación del Sur (SO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

Los estudios que investigan las relaciones entre la circulación a gran escala y

los climas locales y regionales son bastante abundantes. Algunos, han proporcionado conclusiones de interés para la caracterización del clima de la Península Ibérica (Ropelewski y Halpert 1987, Storch *et al.* 1993, Zorita *et al.* 1995, Barnston y Smith 1996, Barnett *et al.* 1997, Corte-Real *et al.* 1998, Goodess y Palutikof 1998, Rodríguez *et al.* 1998). En muchos trabajos (Storch *et al.* 1992, Zorita *et al.* 1992, Rodó *et al.* 1997, Esteban-Parra *et al.* 1998, Gómez *et al.* 1999, Guijarro 1999, Martín-Vide *et al.* 1999, Pita *et al.* 1999, Rodríguez-Puebla *et al.* 1998), se ha relacionado la variabilidad pluviométrica de la Península con la NAO, en especial durante los meses de invierno, que es cuando se establecen los gradientes de presión más fuertes (Moses *et al.* 1997). Los resultados de estos estudios muestran que la fase positiva de la NAO favorece fuertes vientos del oeste y condiciones frías en el sur de Europa, y en el Mediterráneo en general (Visbeck 2002). La fase negativa, favorece la situación contraria, es decir, temperaturas más elevadas y mayor pluviometría.

En el ámbito mediterráneo, se han hallado conexiones entre el fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), y las anomalías en la precipitación desde Israel (Price 1998) hasta la Península Ibérica (Rodó *et al.* 1997, Rocha 1999, Rodríguez-Puebla *et al.* 1998); en especial, durante los meses de otoño y primavera (relación positiva). Sin embargo, Quadrelli *et al.* 2001 no detectaron ninguna conexión entre los patrones de precipitación en el mediterráneo y el ENSO en invierno.

También se ha demostrado la existencia de una oscilación propia de la cuenca Mediterránea (*Mediterranean Oscillation*, MO), de la cual han derivado el MOi (índice de las Oscilación del Mediterráneo) y el WeMOi (índice de la Oscilación del Mediterráneo Oeste o *Western Mediterranean Oscillation Index*) (Conte *et al.* 1989, Palutikof *et al.* 1996, Palutikof 2003). Este índice, según Martín-Vide *et al.* (1999), se correlaciona negativamente con las series de precipitación invernal (enero) y, positivamente con las de verano (julio) en algunas localidades de la costa oriental peninsular.

## PATRÓN GENERAL DEL EFECTO DEL CLIMA LOCAL SOBRE EL CRECIMIENTO RADIAL DEL PINO CARRASCO EN ESPAÑA

Se ha obtenido una FR para cada población de pino carrasco ( $n=27$ ). En ellas, la variable dependiente es la serie de los índices de crecimiento radial y, los predictores, las series de PR y TM mensuales construidas con la finalidad de representar el clima local de cada una de ellas (para más detalles, véase metodología).

A pesar que la mayoría de los modelos obtenidos son significativos al 95% de confianza (CER, GAR, PNF, MIR, RET, ARC, AYN, MER, BIA, BUN, JOA, JOS y BAR) o al 90% de confianza (FUE, BYQ, MCL y ISI), en algunas poblaciones la significación de las FR no supera el 66% (LLA, QRL, MTS, GDM, BON y MON). La Significación del modelo en BAN, MAI y TUR es prácticamente significativo (90% de confianza)

Exceptuando las poblaciones con modelos no significativos al 90 % de nivel de confianza, el porcentaje de varianza explicada por el clima local en la red de poblaciones de pino carrasco española oscila entre un poco más del 10% en MCL, FUE y BYQ; y más del 20% en GAR, RET, AYN y CER. En promedio, las condiciones climáticas definidas por las PR y TM mensuales explican el 15% de la variabilidad entre años en el grosor de los anillos de crecimiento de las masas de pino carrasco.

En la tabla IV-1 se presentan, a modo de resumen, la frecuencia con la que los cocientes de regresión parciales ( $r/ds$ ) son significativos en las 27 FR. Dicho de otro modo, se muestra el porcentaje de poblaciones en las que, según los resultados de las FR obtenidas a escala local, cada una de las variables climáticas consideradas (PR y TM mensuales) afecta significativamente al crecimiento radial (90% de nivel de confianza). En la parte superior, se presentan las frecuencias para las localidades de la Península y, en la inferior, para las poblaciones de las Islas Baleares. En las poblaciones de la Península Ibérica, el efecto de las PR sobre el crecimiento radial es significativo y positivo durante prácticamente todo el año, destacando su mayor influencia en marzo, mayo-junio-julio y en septiembre. También limitan el crecimiento, las PR del otoño-invierno previo a la estación de crecimiento (noviembre, diciembre y enero). Las lluvias de enero son la única variable que no afecta del mismo modo a todas las poblaciones. Su efecto es positivo en algunas poblaciones del NE peninsular, mientras que es negativo en las que presentan un clima más continental (PNF, MIR y RET).

En general, las TM mantienen una relación positiva con el crecimiento en enero-febrero y, negativa desde mayo hasta octubre (destacando el elevado número de poblaciones en las que las TM de julio afectan negativamente el crecimiento). Sin embargo, no se ha detectado ningún efecto notable del clima en agosto, indicando que, en promedio, el crecimiento radial del *P. halepensis* acostumbra a detenerse en la red de localidades estudiadas durante este mes. Finalmente, las TM de noviembre (e incluso en algunas poblaciones, las de diciembre), se relacionan de forma positiva con el crecimiento del año en curso.



Localidades situadas en la Península Ibérica															
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	o	n	d
<b>PR</b>	+11,1	+38,9	+16,7	<b>+44,4</b>	<b>+27,8</b>	<b>+22,2</b>	+5,6	<b>+38,9</b>	+11,1	+5,6	-11,1	+5,6	+5,6	<b>+27,8</b>	<b>+55,6</b>
<b>TMA</b>	-22,2	<b>+38,9</b>	+11,1	+11,1	-11,1	<b>-44,2</b>	-0,0	-16,7	-0,0	<b>+33,3</b>	+16,7	-0,0	-0,0	<b>-38,9</b>	<b>-22,2</b>

Localidades situadas en las Islas Baleares															
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	o	n	d
<b>PR</b>	<b>+57,1</b>	<b>+42,9</b>	<b>+28,6</b>	<b>+71,4</b>	<b>+71,4</b>	<b>+71,4</b>	+0,0	+14,3	<b>+57,1</b>	+0,0	+14,3	+0,0	<b>+28,6</b>	<b>+85,7</b>	<b>+57,1</b>
<b>TMA</b>	<b>+57,1</b>	+0,0	<b>+42,9</b>	-0,0	-0,0	-0,0	<b>-28,6</b>	-0,0	<b>-28,6</b>	-14,3	+14,3	<b>+42,9</b>	-14,3	<b>-28,6</b>	-0,0

**Tabla IV-1.** Porcentaje de localidades en las que, cada variable climática, ejerce un efecto significativo sobre el crecimiento radial. Los porcentajes se han calculado según el número de coeficientes de regresión parciales ( $r/ds$ ) significativos en las FR locales de la Península y de las Baleares que presentan coeficientes de regresión de la verificación ( $R_v/DS_v$ ) significativos al 90% de confianza. Los meses en mayúscula se corresponden con los del año en curso, mientras que en minúscula se indican los meses del año previo al crecimiento. En negrita se han resaltado los meses en los que dicho porcentaje supera el 20% de las poblaciones. En rojo, cuando la relación es negativa y en verde, cuando es positiva. Período analizado 1970-1999.

Además, éstas también se relacionan de forma negativa con el crecimiento del año siguiente. Estos resultados parecen indicar que cuando las TM no son suficientemente elevadas a finales de año, el crecimiento radial del año en curso termina y alcanza mayor importancia la acumulación de reservas que se usarán en el crecimiento del año siguiente.

Estos resultados, de acorde con el patrón de crecimiento radial extraído de las tasas de crecimiento registradas por los dendrómetros en el NE Peninsular (Garraf; Figura II-7), confirman que, en la Península Ibérica: (i) el inicio del crecimiento radial depende de que las temperaturas sean elevadas en febrero (sobretudo las máximas, resultados no mostrados) y las PR abundantes en marzo; (ii) las tasas máximas de crecimiento radial (mayo y septiembre) dependen de las PR, aunque a finales de primavera el crecimiento radial también obedece a que las temperaturas sean suaves (especialmente las máximas, resultados no mostrados); (iii) la falta de agua junto con las elevadas temperaturas en julio provocan una disminución o incluso la detención del crecimiento radial del pino carrasco en verano que, mayoritariamente, tiene lugar en el mes de agosto; (iv) el crecimiento radial continúa mientras las temperaturas de noviembre-diciembre se mantienen altas; en cambio, cuando éstas disminuyen, termina el crecimiento radial, tomando mayor importancia la acumulación de reservas. Probablemente, las PR ejerzan una influencia positiva sobre dicha acumulación de reservas.

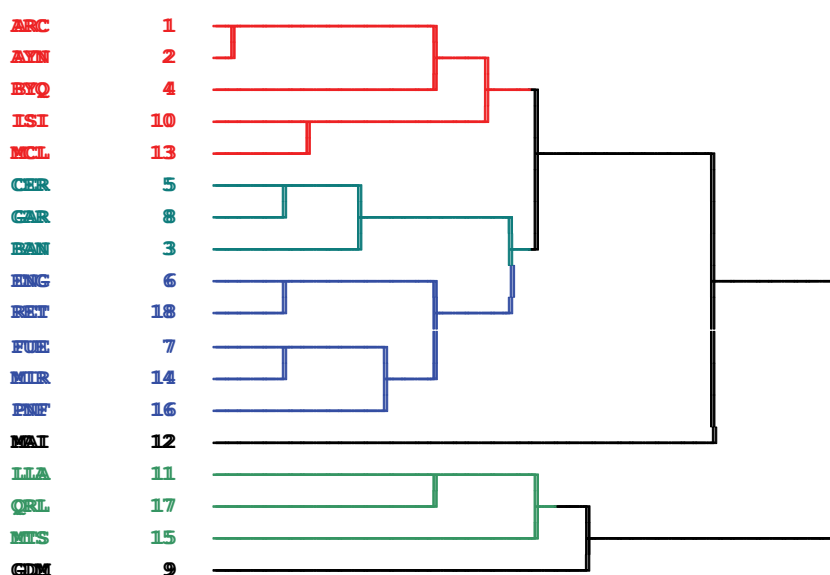
El patrón general de las FR de las Islas Baleares (Tabla IV-1) es muy similar al de las localidades de la Península aunque en éstas, el efecto positivo de las precipitaciones es mucho más evidente y generalizado, prolongándose prácticamente durante todo el año (desde octubre del año previo hasta junio, y también en septiembre del año en curso). Las temperaturas determinan la duración de la estación de crecimiento, igual que lo hacen en la Península, pero en las Baleares, ésta es más larga. Según la significación de los cocientes de regresión parcial, empezaría en enero y terminaría, con mayor frecuencia que en la Península, en diciembre. Debido a la mayor termicidad del clima en las Baleares, el efecto negativo de las TM no sólo tiene lugar en julio, sino también en septiembre. Según los resultados obtenidos, las TM de septiembre limitan notablemente el grosor de los anillos de crecimiento del pino carrasco. También destaca la relación positiva entre las lluvias de marzo y el grosor de los anillos de crecimiento.

Con el fin de identificar grupos de localidades que presentan una respuesta similar a las condiciones climáticas mensuales, se ha realizado un AC basado en los cocientes de regresión obtenidos en las FR locales. De acorde con las acusadas diferencias detectadas entre el clima de las Baleares y de la Península (que han evidenciado el índice de Emberger y los ACP y AC realizados con las series climáticas e índices fitoclimáticos), se han tratado por separado las localidades de estas dos territorios. De esta manera, se ha logrado una mayor claridad en los resultados. Los dendrogramas obtenidos se presentan en las figuras IV-1 y IV-2.

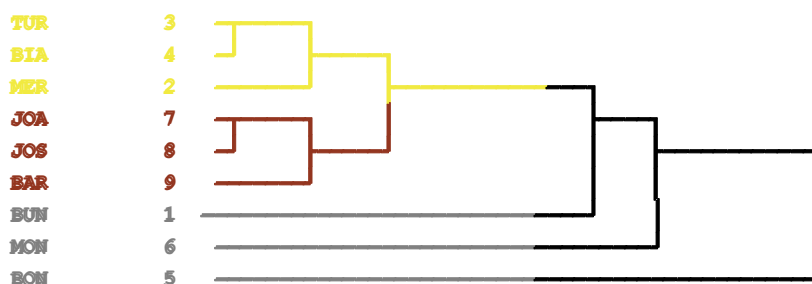
En el dendrograma construido para las cronologías ubicadas en la Península (Figura IV-1) se pueden distinguir cuatro grupos de bosques: uno, formado por los cinco bosques situados en el sur e interior peninsular (ARC, AYN, BYQ, ISI y MCL); otro, constituido por las tres localidades catalanas más septentrionales (BAN, CER,

GAR); el tercero, compuesto por las localidades de la Catalunya interior (con un clima más continental; LLA, QRL, MTS); y el último, integrado por los cuatro bosques situados en la cuenca del Ebro (PNF, MIR, RET, FUE) junto con ENG (situada en el interior de València). Quedan dos localidades (GDM y MAI) que, atendiendo al AC realizado (Figura IV-1), presentan unas relaciones crecimiento-clima singulares (y además, éstas son poco significativas).

La clasificación obtenida para las localidades de las Islas Baleares (Figura IV-2) ilustra la clara diferenciación existente entre la respuesta a las condiciones climáticas de los pinos de Menorca y la de los de las Pitiüses. Según los resultados obtenidos, las tres cronologías ubicadas en Mallorca presentan respuestas a las condiciones climáticas individualizadas.



**Figura IV-1.** Diagrama de clasificación obtenido con el análisis de cluster realizado para las 18 poblaciones de pino carrasco de la Península Ibérica. Dicho análisis se ha basado en la matriz de cocientes de regresión parciales de las FR locales. Los distintos colores identifican los grupos establecidos. Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver el texto.

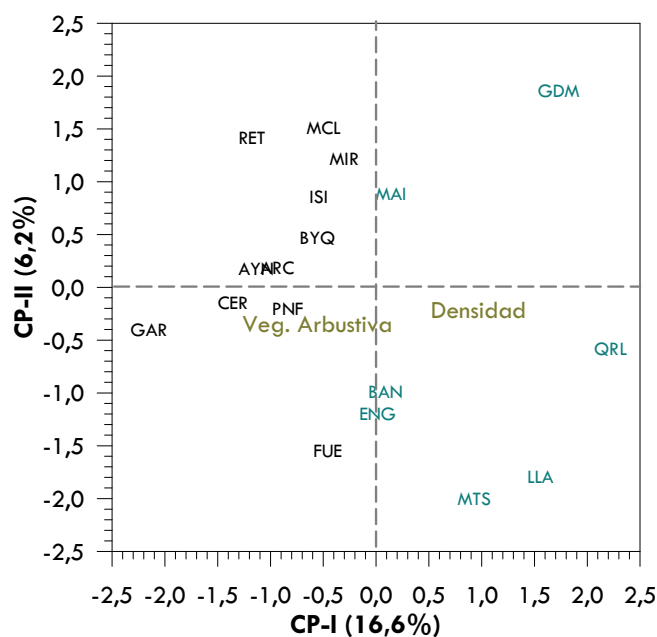


**Figura IV-2.** Diagrama de clasificación obtenido con el análisis de cluster para las 9 poblaciones de pino carrasco de las Islas Baleares. Dicho análisis se ha basado en la matriz de cocientes de regresión parciales de las FR locales. Los distintos colores identifican los grupos establecidos. Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver el texto.

	NE Peninsular			Cuenca del Ebro			Sur Peninsular				Balears N			Balears S		
	BAN	CER	GAR	FUE	MIR	RET	ARC	AYN	BYQ	ISI	MER	BIA	BUN	JOA	JOS	BAR
PR o		+	+						+	+	+	+			+	+
PR n		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
PR d		+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		+	+
PR E		+	+	+	---	---					+	+			+	+
PR F		+	+								+	+				
PR M			+	+	+	+	+	+		+		+				+
PR A					+	+		+			+	+	+	+	+	
PR M			+	+	+	+	+	+		+	+	+	+			+
PR J	+	+		+			+	+			+	+	+	+	+	
PR J				+	+											
PR A											+	+				
PR S	+	+	+		+		+	+			+		+		+	+
PR O				+												
PR N						+						+				
PR D					---											
TM o																
TM n		---	---	---					---		---	---				
TM d							---	---	---						---	
TM E										---	+	+	+	+	+	
TM F					+	+				+						
TM M	+	+					+	+						+	+	+
TMA																
TM M																
TM J																
TM J				---	---	---	---	---	---	---	---			---		
TMA																
TM S		---	---			---						---				
TM O									---							---
TM N		+	+		+	+					+		+			
TM D							+	+	+	+				+	+	+
	N-N	S-S	S-S	N-S	N-S	S-S	S-S	S-S	N-S	N-N	S-S	S-S	N-N	S-N	S-N	N-S

**Tabla IV-2.** Evolución temporal esquematizada del efecto de las PR y TM mensuales sobre el crecimiento radial del pino carrasco en distintas localidades de la red estudiada a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. El signo utilizado indica el tipo de efecto (+ positivo y - negativo) y, en negrita, se destacan los casos en los que los cocientes de regresión parciales de las FR obtenidas son significativos al 90% de confianza. El primer signo hace referencia al período 1950-1979, o 1960-1989 según la localidad, y el segundo al período 1970-1999. En la parte inferior de la figura se indica si el modelo obtenido es o no significativo (S y N, respectivamente).

Con la finalidad de contrastar en qué grado las características de los bosques pueden condicionar la sensibilidad de los árboles a las condiciones climáticas, se ha realizado un RDA basado en las relaciones crecimiento-clima de cada bosque y, considerando como variables del entorno: las características estructurales de las masas forestales (densidad, área basal, DAP y altura promedios del dosel arbóreo, presencia de regeneración, tipo de sotobosque, número de estratos verticales), su localización (latitud, longitud, altitud, orientación y pendiente), la edafología, el sustrato predominante, la geología y el tipo de vegetación. En el diagrama de ordenación (Figura IV-3), puede verse que la respuesta a las condiciones climáticas de los bosques de pino carrasco depende en gran medida de la densidad de la masa forestal y del tipo de vegetación arbustiva. Merece destacar la relación inversa detectada entre ambas variables (quedan opuestos en la representación gráfica de la ordenación, figura IV-3), resultado que nos induce a pensar que ambos estratos forestales (arbóreo y arbustivo) compiten entre sí. El resto de variables consideradas, según este análisis, no son significativas (test de Montecarlo con 999 permutaciones).

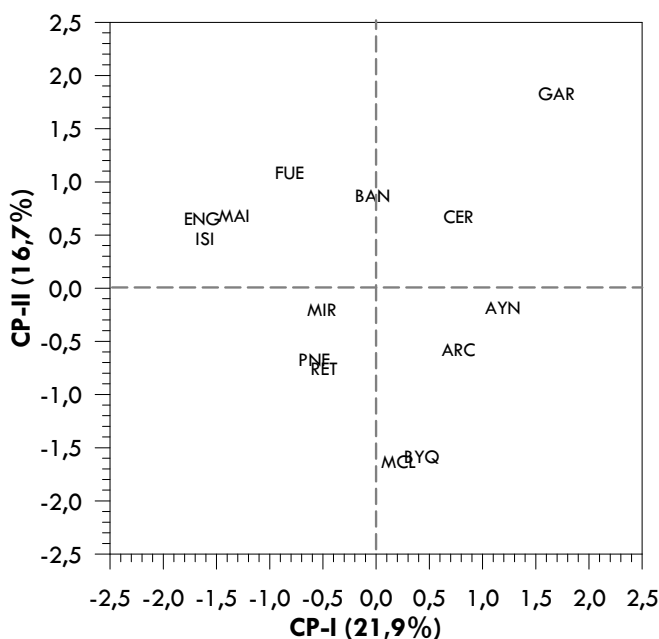


**Figura IV-3.** Diagrama de ordenación obtenido mediante un RDA basado en los cocientes de regresión parciales de las funciones respuesta locales (período 1971-1999). Se han considerado como variables ambientales las concernientes a la estructura y características generales de las masas forestales ubicadas en la Península Ibérica. Para más detalles, ver texto.

Por otro lado, la estrecha relación que hay entre la ordenación obtenida con el RDA y la significación de las FR queda reflejada en la elevada correlación que hay entre ambas variables. En efecto, la correlación media entre el cociente de regresión de la verificación ( $R_v/STD_v$ ) y los valores de cada localidad con el CP-I es

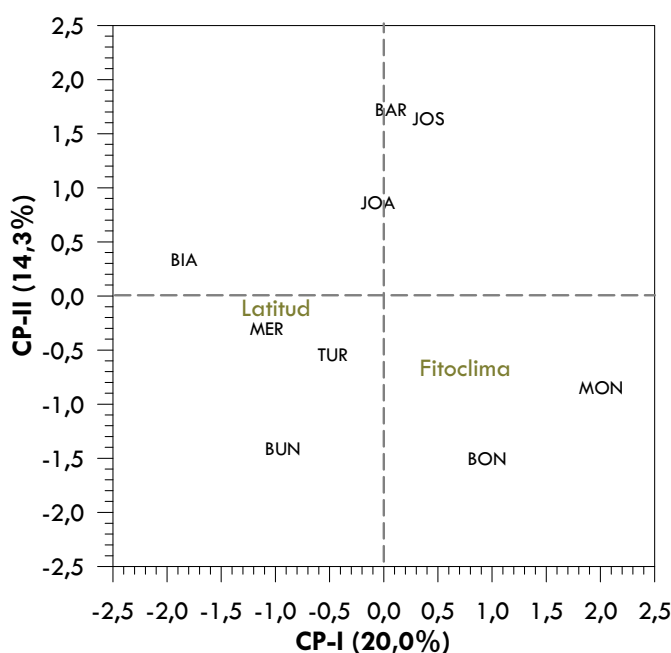
de 0,948 en la Península y 0,600 en las Baleares (relaciones significativas al 99%). De acuerdo con estos resultados, las localidades en las que no se ha podido obtener un modelo significativo que relacione el grosor de los anillos de crecimiento con las variables de TM y PR mensuales, son las que presentan densidades poblacionales superiores a los 1000 pies/ha (LLA, QRL y MTS; ver Tabla III-4), quedando situadas en la mitad derecha del diagrama (valores positivos con el CP-I). En GDM (situada en el extremo superior derecho del diagrama de ordenación), la FR obtenida no es significativa, seguramente como consecuencia de las severas condiciones del entorno en el que viven estos árboles. Los más destacables pueden ser el tipo de suelo (dunas de arena) y el efecto dañino de la brisa marina sobre los árboles (Raventós *et al.* 2001). BAN, MAI y ENG (que presentan valores positivos para el CP-I pero muy cercanos a cero) presentan FR con una significación global elevada pero sin llegar a ser significativa. Se trata de masas forestales relativamente densas, con áreas basales muy elevadas (que superan los 36,00 m<sup>2</sup>/ha). Dicho de otro modo, son bosques constituidos por muchos árboles de diámetros grandes, que posiblemente compiten fuertemente entre sí (Tabla III-3). Estos resultados sugieren que la competencia entre árboles o entre éstos y la vegetación arbustiva (que en los pinares de pino carrasco puede llegar a estar muy desarrollada), condicionan su crecimiento enmascarando los efectos que las condiciones climáticas ejercen sobre su crecimiento radial.

El ACP obtenido una vez eliminadas las localidades con FR menos significativas (GDM, LLA, QRL y MTS) muestra que la disposición de las localidades atiende principalmente a su ubicación geográfica y a la climatología de cada región (Figura IV-4). Las tres localidades catalanas se encuentran en el cuadrante superior derecho; las cuatro poblaciones más meridionales (MCL, BYQ, AYN y ARC), en el cuadrante inferior derecho; en la sección inferior izquierda, se encuentran las localidades de la cuenca del Ebro; y el resto (que comparten una acusada continentalidad del clima), en el cuadrante superior izquierdo.



**Figura IV-4.** Diagrama de ordenación obtenido mediante un RDA basado en los cocientes de regresión parcial de las funciones respuesta locales para las 14 localidades peninsulares más sensibles a las condiciones climáticas (período 1971-1999). Se han considerado como variables ambientales, las concernientes a la estructura y características generales de las masas forestales ubicadas en la Península Ibérica. Para más detalles, ver texto.

El RDA realizado para los bosques de las Islas Baleares (Figura IV-5) pone de manifiesto que, en éstos, las relaciones crecimiento-clima están fuertemente condicionadas por la situación geográfica (longitud) y el tipo de fitoclima (ambas variables explican de forma significativa -al 90% de confianza- un 45,8% de la variabilidad en la matriz de cocientes de regresión parciales obtenidos en las FR). El efecto del fitoclima en la ordenación obtenida es coherente con el hecho que, en el conjunto de las Baleares (tal y como se ha mostrado en el capítulo II), el gradiente climático es mucho más acusado por dos motivos: porque se produce en un espacio geográfico menor, y porque no está desdibujado por el gradiente de continentalidad que encontramos en la Península.



**Figura IV-5.** Diagrama de ordenación obtenido mediante un RDA basado en los cocientes de regresión parciales de las funciones respuesta locales para las localidades ubicadas en las Islas Baleares (período 1971-1999). Para más detalles, ver texto.

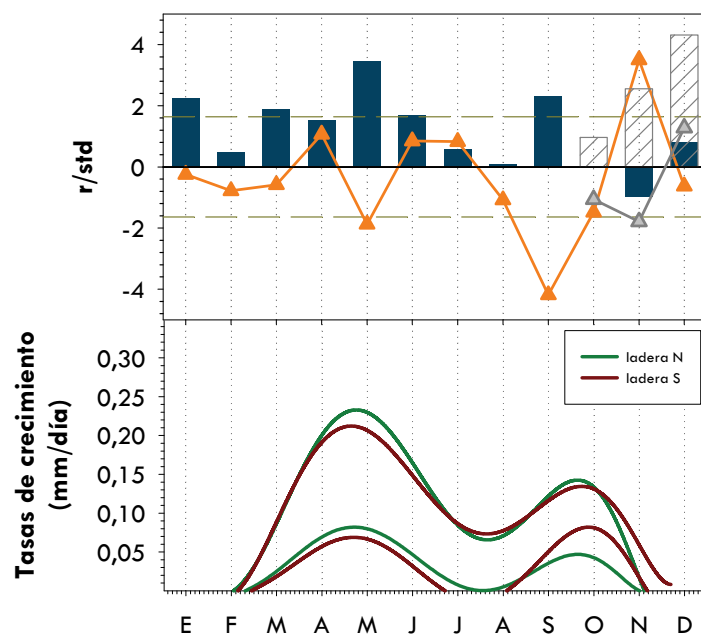
## RELACIONES ENTRE EL CRECIMIENTO ANUAL (GROSOR DE LOS ANILLOS) Y EL CLIMA EN EL GARRAF Y SU RELACIÓN CON EL PATRÓN DE CRECIMIENTO

La figura IV-6 muestra como el crecimiento radial del pino carrasco en la localidad del Garraf está esencialmente limitado por la falta de agua. La relación entre las PR y el crecimiento es positiva desde marzo hasta junio, siendo más fuerte (cocientes de regresión parcial más elevados) en el mes de mayo, cuando se produce el máximo en las tasas de crecimiento (según el registro de los

dendrómetros), y en septiembre, cuando empieza el segundo máximo de crecimiento. Además, las PR de los meses previos a la estación de crecimiento (noviembre, diciembre y enero) también inciden positivamente sobre éste, indicando que durante estos meses, seguramente, el pino carrasco acumula reservas que se utilizarán en la formación del anillo del año siguiente. De hecho, algunos autores, apuntan a un posible almacenamiento, no sólo de fotoasimilados, sino también de agua en las raíces del pino carrasco (Schiller y Cohen 1995, Borghetti *et al.* 1998, Schiller *et al.* 1986). Esta interpretación está de acuerdo con la escasa capacidad de reserva de agua del suelo en esta localidad debido a su porosidad y a la naturaleza calcárea del sustrato (Abril 1987).

El efecto de las TM es, en general, inverso al de las PR (Figura IV-6), destacando sobretodo el efecto negativo y significativo que tienen en mayo y septiembre, y el efecto (positivo y significativo) que tienen en noviembre. Éste último resultado, coincide con el final del período de crecimiento (según las series de datos registradas con los dendrómetros), de manera que, probablemente, el final de la estación de crecimiento del pino carrasco en el Garraf viene determinado por la disminución de las temperaturas. El efecto negativo de las TM de noviembre sobre el crecimiento del año siguiente parece indicar que en este mes, cuando termina el crecimiento radial por la disminución de las TM, tiene lugar la acumulación de reservas.

Por último, merece destacar la débil relación entre el clima y el crecimiento durante los meses de verano (especialmente en agosto) resultado que, de acuerdo con el patrón de crecimiento radial (Figura IV-6 y I-8), indica que éste se detiene durante el verano a causa de la aridez y, solamente se reestablece con las precipitaciones de septiembre si las temperaturas se mantienen suaves.

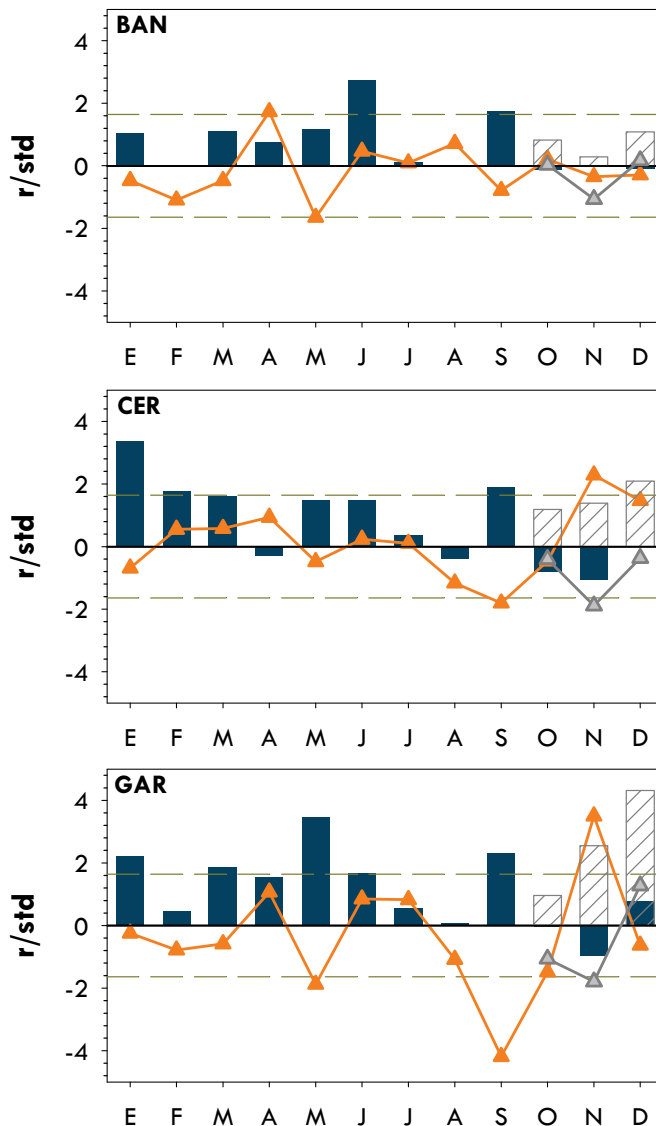


**Figura IV-6.** Arriba, cocientes de regresión parcial obtenidos en la función respuesta calculada con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Abajo, patrón de crecimiento radial en perímetro del pino carrasco en el Garraf obtenido a partir del registro de los dendrómetros para el período 1995-2004. Para más detalles, ver texto.



## RELACIONES CRECIMIENTO-CLIMA EN LA RED DE LOCALIDADES A ESCALA LOCAL

En la figura IV-7 se presentan las FR obtenidas para las tres localidades más septentrionales de la red (BAN, CER y GAR). En Banyoles (BAN), la localidad con el clima más húmedo (Figura II-2), el modelo obtenido no llega al 90% de nivel de confianza ( $R_v/STD_v=1,475$ ), motivo por el cual carece de valor predictivo. No obstante, puede ser indicativo de qué variables climáticas limitan más el crecimiento radial en dicha población (explica el 12,96% de la variabilidad en el grosor de los anillos de crecimiento). Atendiendo a los resultados obtenidos, el crecimiento radial del pino carrasco está principalmente limitado por la falta de agua, especialmente en las dos localidades más áridas (GAR y CER), hecho que explicaría la mayor significación global de estos dos modelos ( $R_v/STD_v$  de 7,029 y 2,513, respectivamente).



**Figura IV-7.** Cocientes de regresión parciales ( $r/std$ ) de las funciones respuesta obtenidas para Banyoles (BAN), Sta. Maria de Cervelló (CER) y Garraf (GAR) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

En las tres localidades, las PR desde febrero-marzo hasta junio, y también las de septiembre están relacionadas de forma positiva con el crecimiento en grosor del año en curso. Las PR de octubre, noviembre, diciembre y enero previos a la estación de crecimiento, también afectan (relación positiva) a la formación del anillo en la siguiente estación de crecimiento, sobretodo en la localidad más seca (GAR). Los cocientes de regresión obtenidos para las TM y sobretodo, para las PR en los meses de mayor estrés hídrico (julio y agosto) son considerablemente bajos, indicando que, en general, durante estos meses el pino carrasco, detiene su crecimiento como norma general. De esta manera, la bimodalidad del patrón de crecimiento radial del pino carrasco en estas tres localidades se pone de manifiesto en los elevados cocientes de regresión parcial de las PR en mayo-junio y septiembre, y en el nulo efecto de las lluvias en julio y agosto (Figura IV-7).

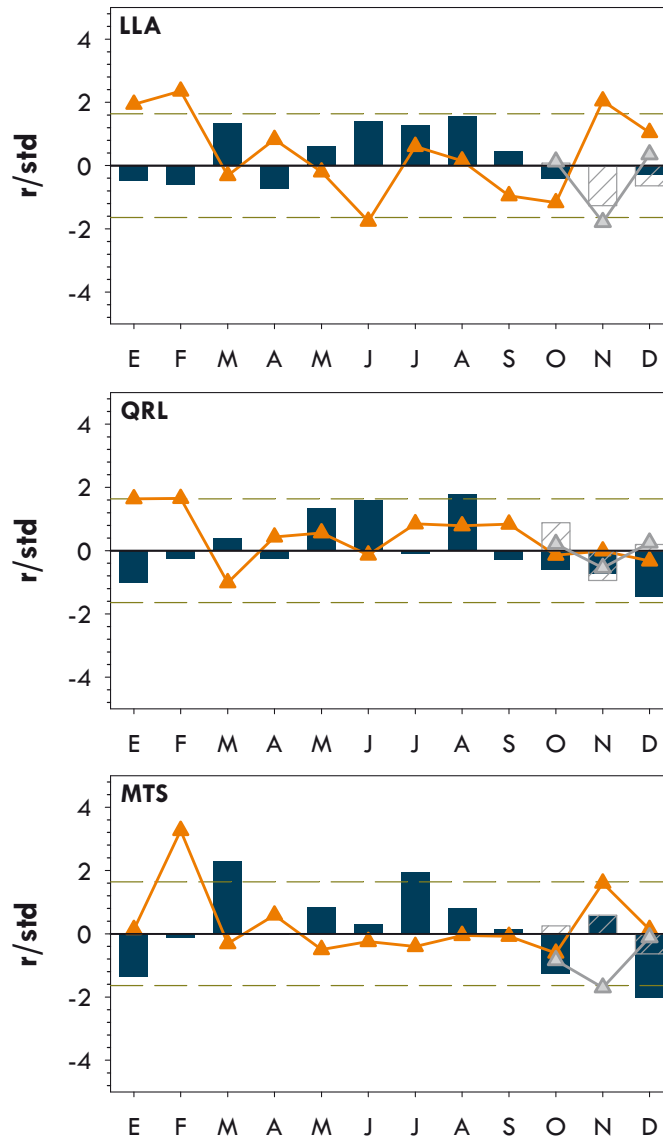
El efecto de las TM sobre el crecimiento es, por norma general, opuesto al de las PR, sobretodo cuanto más árido es el clima (GAR). Se ha detectado un efecto negativo y significativo de las TM de mayo y septiembre. Este resultado, que coincide con los obtenidos en Grecia por Papadopoulos (1992), nos conduce a pensar que las elevadas temperaturas causan un mayor estrés en el árbol, al aumentar la pérdida de agua mediante la transpiración (Oberhuber *et al.* 1998, Liang *et al.* 2001). Esta relación, de acuerdo con la explicación de Rolland (1993), sugiere que la evapotranspiración se acelera y el déficit de presión de vapor de agua en la atmósfera se acentúa debido a las elevadas temperaturas durante el día; como consecuencia, se inhibe el crecimiento radial. Por otro lado, tanto en CER como en GAR, las temperaturas de noviembre tienen una relación positiva con el crecimiento indicando que, seguramente, son el principal factor limitante del crecimiento radial al final de período de crecimiento (Figura IV-7).

En ninguna de las tres localidades de la Catalunya interior (LLA, QRL y MTS) se ha podido obtener una FR significativa al 90% de nivel de confianza. La causa, probablemente sea, tal y como ha indicado el RDA (Figura IV-4), que se trata de poblaciones muy densas (con más de 1000 pies/ha) y estructuras forestales con una dinámica y régimen de perturbaciones que distorsionan el efecto de las condiciones climáticas (Tabla III-3, Cuadros III-16, III-21 y III-23). Por lo tanto, los modelos obtenidos explican un porcentaje muy bajo de la varianza en las series de crecimiento radial (3,03%, 0,62% y 3,03%, respectivamente) y, consecuentemente, estos resultados deben interpretarse como meramente indicativos (Figura IV-8).

En estas tres poblaciones, desaparece el efecto positivo de las precipitaciones de septiembre y aparece un efecto positivo de las lluvias de verano sobre el crecimiento (en LLA y QRL, las de agosto y en MTS, las de julio), de manera que el patrón bimodal del crecimiento radial se pierde. A pesar de ello, en QRL, es probable que los árboles detengan de forma habitual el crecimiento en julio (cociente de regresión del mes de julio muy próximo a cero).

El efecto positivo de las TM de febrero hace pensar que el período de crecimiento radial del pino carrasco, probablemente se inicia en este mes, cuando las temperaturas empiezan a ser más elevadas. Según estos resultados, el crecimiento radial del pino carrasco también mantiene una clara relación positiva con las PR de marzo. Por otro lado, el efecto positivo y significativo de las TM de

noviembre (en LLA y MTS) podría indicar que éstas determinan el final del período de crecimiento en las poblaciones de la Catalunya interior.



**Figura IV-8.** Cocientes de regresión parciales ( $r/std$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las poblaciones de Llacuna (LLA), Querol (QRL) y Serra de Montsant (MTS) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

El efecto positivo y significativo de las TM, junto con el negativo de las lluvias de enero, podría indicar que las bajas temperaturas invernales de estas localidades (Figura II-2) pueden causar daños, de forma más o menos frecuente, que repercutan en el crecimiento posterior de los pinos. En este sentido, Nicault

(1999), basándose en los datos del seguimiento del crecimiento radial del pino carrasco en Francia durante dos años, constata que las temperaturas bajas de invierno, independientemente de las precipitaciones, pueden reducir de forma considerable el crecimiento. La causa, según Ne'eman y Trabaud (2001), es el retardo en el inicio del período de crecimiento.

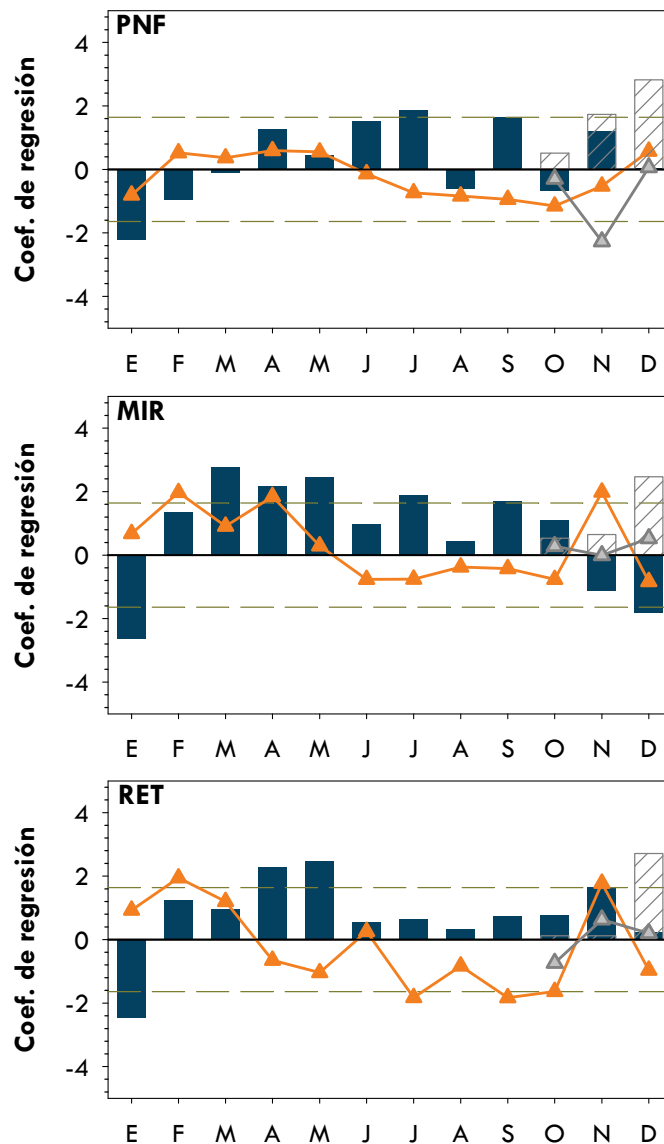
Finalmente, el efecto de las condiciones climáticas del otoño previo a la estación de crecimiento no es tan notable como en las localidades de la Catalunya norte.

El grupo constituido por las localidades ubicadas en la cuenca del Ebro y por ENG (Serra de Enguera, interior de la provincia de València) también presenta una considerable limitación del crecimiento atribuible a la falta de agua, tal y como indica el elevado número de meses en los que el efecto de las PR sobre el crecimiento es significativo, especialmente en MIR (Figura IV-9). La significación de las FR es mayor en las poblaciones de la provincia de Zaragoza (PNF, MIR y RET, sobretodo en esta última). En las tres el modelo obtenido supera el 95% del nivel de confianza, y explican, respectivamente, el 16,65%, el 16,97% y el 20,34% de la varianza. En FUE el modelo es significativo al 90 % y explica el 13,47% de la varianza, mientras que en ENG (11,09% de varianza explicada) el cociente de regresión de la verificación no llega al 90% de confianza (aunque por poco).

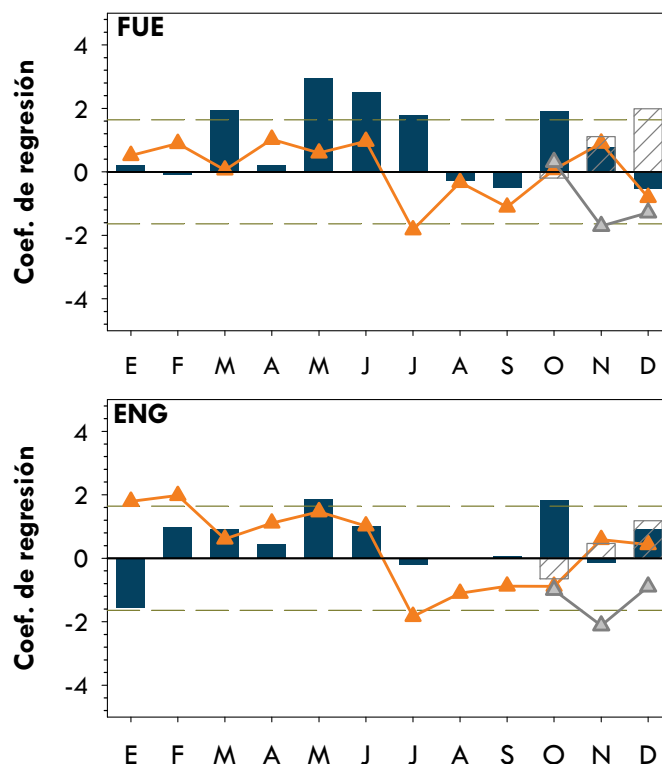
En estas poblaciones del valle del Ebro, el efecto de las PR empieza en febrero y se prolonga hasta mayo-junio o incluso julio, según la duración e intervalo del período seco de cada lugar, aunque el efecto del sustrato, especialmente en las localidades que presentan yesos (MIR y RET) es considerable. Posteriormente, el efecto positivo de las PR se recupera con las lluvias de otoño (septiembre y/o octubre, según la localidad). De esta manera, atendiendo a los valores de los cocientes de regresión parciales de las FR se desprende que: en MIR y PNF, el crecimiento del pino carrasco tan sólo se detiene como norma general en agosto; en FUE, se detiene generalmente en julio y agosto; en ENG se detiene en julio, agosto y septiembre; y en RET se detiene en junio, julio, agosto y septiembre. Los resultados obtenidos son coherentes con el momento en el que se produce el pico pluviométrico de otoño en cada localidad (en PNF y MIR es en septiembre, mientras que en FUE, ENG y RET es en octubre). En resumen, parece que el crecimiento de las poblaciones de la cuenca del Ebro termina al empezar la sequía estival y se reinicia con las lluvias de otoño, haciéndose más acusado el patrón bimodal del pino carrasco. Por otro lado, el efecto significativo y positivo de las lluvias del otoño previo a la estación de crecimiento es considerable, sobretodo en PNF, MIR, RET y FUE. Papadopoulos (1992), Nicault (1999) y Pons (2002), también remarcaron la importancia de las lluvias del otoño-invierno previos a la estación de crecimiento.

El efecto de las TM sobre el crecimiento radial del pino carrasco en estas localidades es, en general, poco acusado (bajos  $r/ds$ ); no obstante, suelen mantener una relación positiva con el crecimiento durante la primera mitad del año (hasta junio) y una relación negativa durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre. Destaca en MIR y RET el efecto significativo y positivo de las TM en noviembre, cuando posiblemente se termina el período de crecimiento. Además, las

TM en enero presentan, al igual que las localidades de la Catalunya interior, un efecto positivo sobre el crecimiento y las PR, un efecto negativo, poniendo de manifiesto que el severo frío invernal en esta región conlleva, de forma más o menos frecuente, una reducción en el crecimiento radial del pino carrasco.



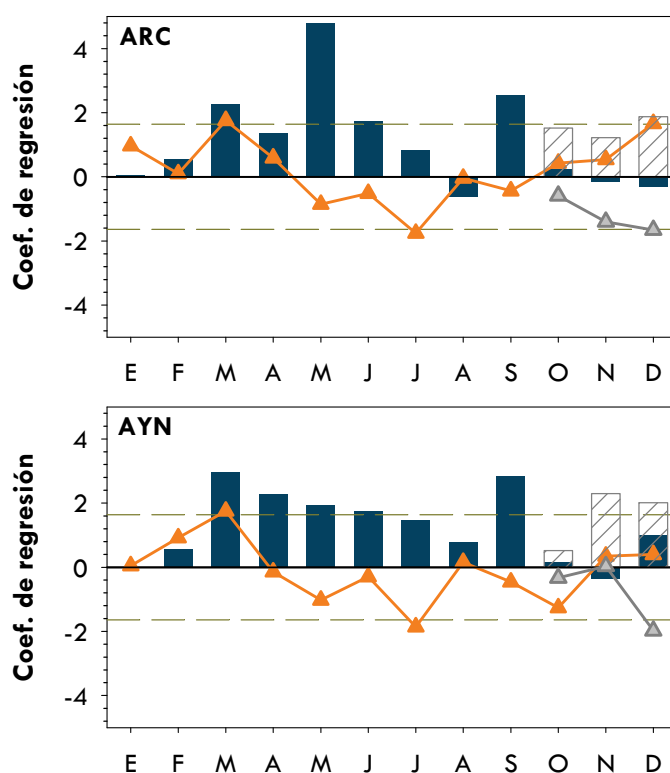
**Figura IV-9.1.** Cocientes de regresión parciales ( $r/std$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las masas forestales de las localidades de Zaragoza (PNF, MIR y RET) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.



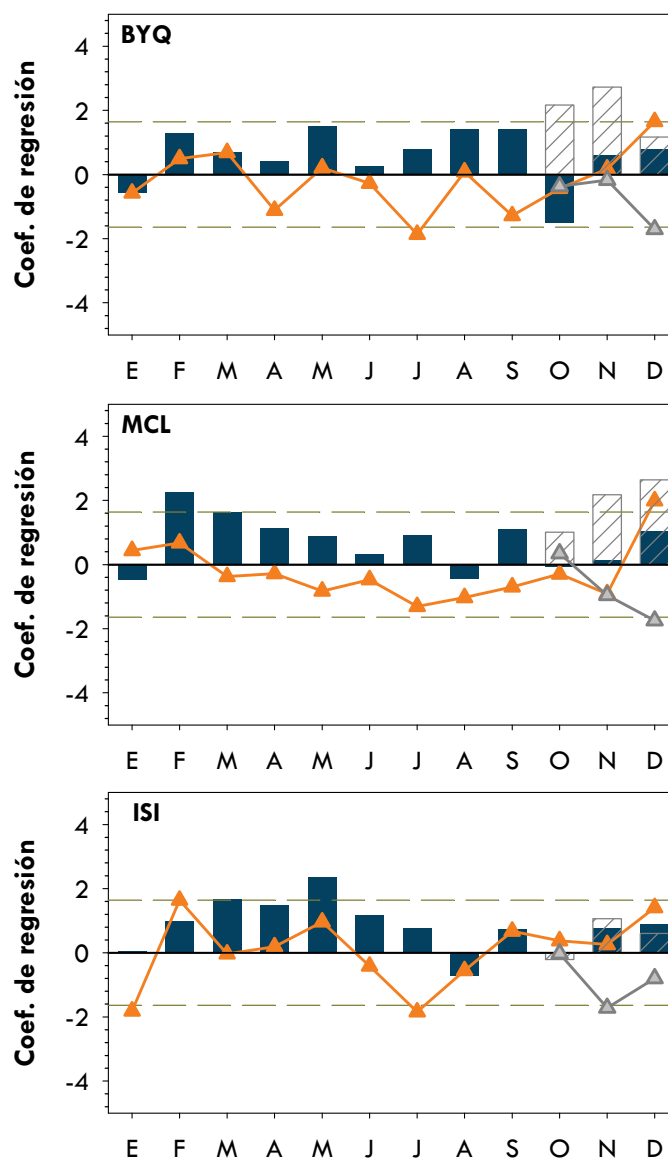
**Figura IV-9.2.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las masas forestales de Fuentespalda (FUE, Teruel) y Serra de Enguera (ENG, València) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

Los resultados obtenidos en las FR para las poblaciones de pino carrasco más meridionales (BYQ y MCL, en Andalucía) y las tres ubicadas en el interior y sur de la Península (AYN, ARC y ISI, situadas en Albacete, Murcia y València) se muestran en la figura IV-10. Todas las FR son significativas al 90% de confianza. Sin embargo, la significación global de las FR es mucho mayor en AYN y ARC (en Albacete y Murcia y con  $R_v/\text{STD}_v$  de 3,198 y 2,586, respectivamente) que en el resto, siendo MCL la localidad en la que el modelo explica un porcentaje menor de la variabilidad en las tasas de crecimiento anuales (10,37%,  $R_v/\text{STD}_v=1,674$ ). Como consecuencia, en AYN y ARC (dónde los modelos explica el 23,23% y el 18,65%, respectivamente), los cocientes de regresión parciales alcanzan valores más altos que en BYQ, ISI y, sobretodo en MCL, donde son más bajos. Una posible causa de estas diferencias podría ser la desigual distancia geográfica entre los bosques estudiados y los observatorios meteorológicos según la localidad (Anexo A). Por todos estos motivos, la interpretación de los resultados debe realizarse con más cautela en MCL que en el resto de poblaciones.

En estas poblaciones, el crecimiento del pino carrasco también está principalmente limitado por las lluvias (mantienen su efecto positivo desde febrero hasta diciembre). No obstante, las PR de octubre, noviembre y diciembre están más estrechamente relacionadas con el crecimiento radial del año siguiente. También se ha detectado una relación negativa entre las TM de julio y el crecimiento radial y una relación muy baja de las variables climáticas (PR y TM) y el crecimiento en agosto, excepto en BYQ (la localidad ubicada a mayor altitud, 1280 m snm.), donde el efecto positivo de las lluvias de verano es notable. De manera que, posiblemente, el pino carrasco detiene su crecimiento en julio a causa de las elevadas temperaturas y lo reinicia con las lluvias de septiembre (relación positiva). No obstante, en ISI (València), el reinicio de la actividad en otoño, según los resultados obtenidos, no es tan clara. El efecto positivo de las TM del diciembre y la relación negativa entre las TM de este mes y el crecimiento del año siguiente, sobretudo en las poblaciones más sureñas, podría indicar que el pino carrasco termina su crecimiento radial en diciembre, siendo la estación de crecimiento un mes más larga que en las poblaciones estudiadas en el norte peninsular (Figura IV-11).



**Figura IV-10.1.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las poblaciones de pino carrasco en la Sierra de Archivel (ARC) y Ayna los Luisos (AYN) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

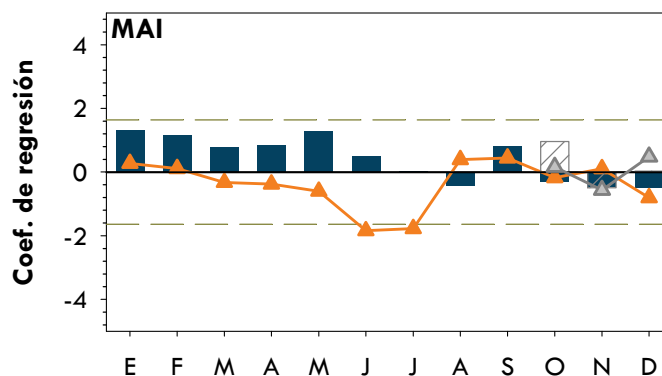


**Figura IV-10.2.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las poblaciones de pino carrasco en Pinar de Bayarque (BYQ, Almería), El Mencal (MCL, Granada) y Los Isidros (ISI, València) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

En MAI no se ha obtenido ningún modelo que relacione, de forma significativa al 90%, el crecimiento radial del pino carrasco con las condiciones climáticas ( $R_v/\text{STD}_v=1,349$ ). No obstante, en la figura IV-11 se presentan los resultados obtenidos con el fin de apuntar qué factores climáticos podrían estar limitando el crecimiento en dicha localidad. El porcentaje de varianza explicada



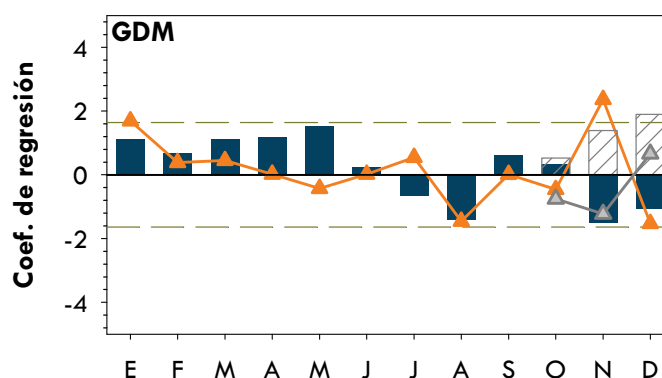
por el modelo es del 7,08%. Atendiendo a los cocientes de regresión parciales obtenidos en la FR, el crecimiento radial del pino carrasco en MAI posiblemente esté limitado tanto por las escasas lluvias, como por las elevadas temperaturas (sobre todo en verano). Las PR se relacionan de forma positiva con el grosor de los anillos desde enero hasta junio, momento en el que posiblemente se detiene el crecimiento a causa de la falta de agua y de las elevadas temperaturas (efecto negativo y significativo de las TM de junio y julio). De hecho, al igual que en el grupo de localidades con clima claramente continental (PNF, MIR, RET, ENG y FUE), el efecto de las elevadas TM de julio es significativo y negativo (único coeficiente significativo del modelo), resultado que denota que éstas podrían contribuir notablemente en la interrupción del crecimiento. El elevado efecto de las PR en mayo podría indicar que, es en este mes cuando se produce el máximo en las tasas de crecimiento radial, resultado que coincide con los obtenidos por Dorado *et al.* (2005). Según los cocientes de regresión obtenidos, el crecimiento radial se reanuda en septiembre coincidiendo con las lluvias de otoño, aunque la relación del crecimiento con el clima en otoño no es significativa en el modelo obtenido. Estos resultados son coherentes con la descripción de la actividad del cámbium realizada por Dorado *et al.* (2005) en la zona. Dorado *et al.*, basándose en la identificación y recuento de células durante el año 2004, muestran que el 90% del anillo de crecimiento de *P. halepensis* está totalmente formado a mediados de agosto y, que las lluvias de octubre solamente contribuyen a la formación de la pared secundaria.



**Figura IV-11.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para la población de pino carrasco ubicada en la Serra de Maigó (MAI, València) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

Por último, en GDM (Figura IV-12), la FR obtenida es muy poco significativa (por debajo del 66% de nivel de confianza,  $R_v/\text{STD}_v=0,629$ ) y explica menos del 2% de la variabilidad en el grosor de los anillos de crecimiento, indicando que el crecimiento de los árboles está muy poco afectado por las variables climáticas consideradas. La población estudiada es una repoblación realizada a principio de

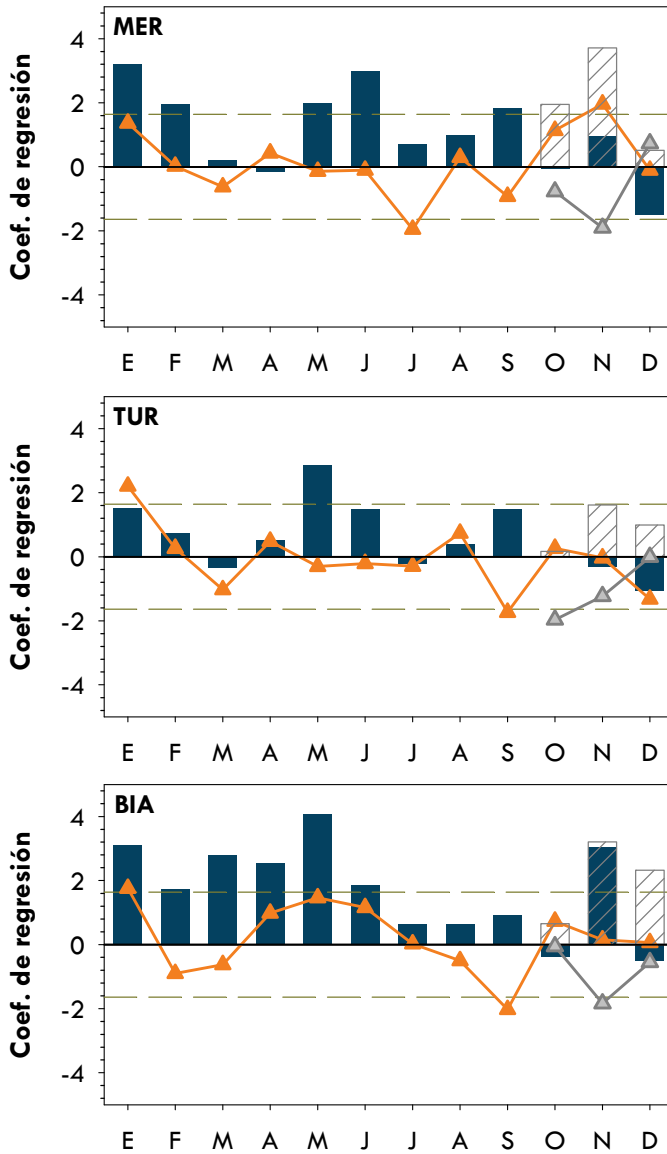
siglo con el fin de fijar las dunas costeras, de manera que el sustrato (arena) tiene una muy reducida capacidad de retención de agua. De manera que, las PR y TM registradas en un observatorio meteorológico, por más cercano que sea, no representan con la suficiente exactitud las condiciones climáticas que constriñen el crecimiento radial del pino carrasco (especialmente en relación al balance hídrico del suelo y, como consecuencia, al agua disponible para el pino carrasco). Los resultados obtenidos, coincidiendo con las correlaciones obtenidas por Raventós *et al.* (2001), indican que las precipitaciones limitan fuertemente el crecimiento radial durante prácticamente todo el año (efecto positivo), especialmente en mayo y septiembre; mientras que las temperaturas, en general, se relacionan negativamente con el crecimiento durante los meses más cálidos; el resto del año no parece que afecten al crecimiento radial de forma significativa (Figura IV-12).



**Figura IV-12.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para la población de pino carrasco ubicada en Guardamar del Segura (GDM, Alacant) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

Las localidades de las Islas Baleares, tal y como muestra el dendrograma obtenido en el AC (Figura IV-2), se dividen en dos grupos de localidades: las ubicadas en Menorca y las poblaciones de las Pitiüses. Las localidades de Mallorca presentan FR específicas y diferentes entre sí en correspondencia con la heterogeneidad de bosques y condiciones ambientales muestreadas (Cuadros III-5, III-6 y III-20 y Figuras II-9 y II-11). La figura IV-13 presenta los resultados obtenidos para las tres localidades de Menorca; la figura IV-14 para las de Eivissa y Formentera; y la figura IV-15 para la única localidad mallorquina en la que se ha podido obtener un modelo significativo que relacione el crecimiento radial con las precipitaciones y temperaturas mensuales (BUN). En MON y BON las FR no superan el 66% del nivel de confianza. Seguramente, este resultado se deba a que la elevada competencia entre árboles y de éstos con el abundante sotobosque (Cuadros III-5 y III-20) modifica las relaciones crecimiento-clima. Además, en BON la longitud de las series climáticas es demasiado corta (menos de 30 años). De las

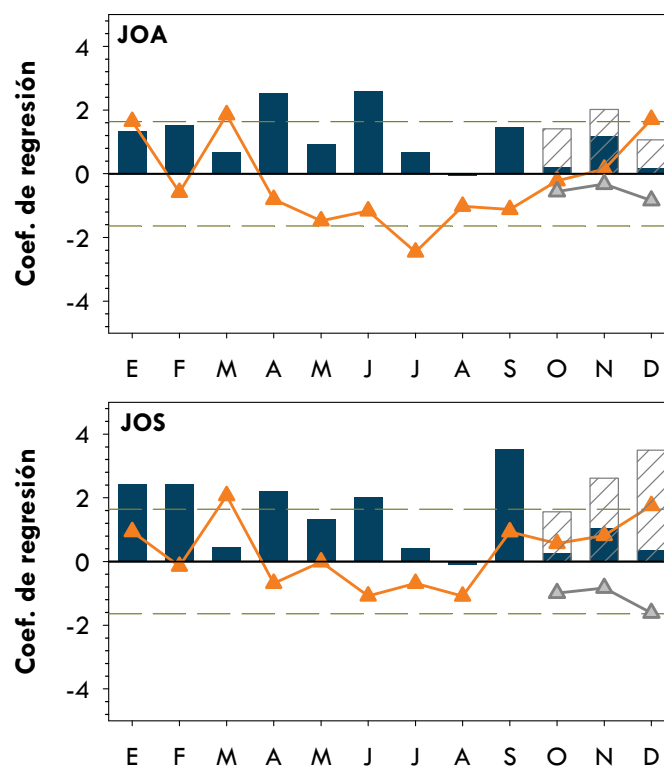
tres localidades menorquinas, en TUR, el modelo obtenido es poco significativo (el porcentaje de varianza explicada por el modelo es del 6,30%), resultado que muy probablemente, esté relacionado con el tipo de suelo (muy arenoso) y su escasa capacidad de retención hídrica.



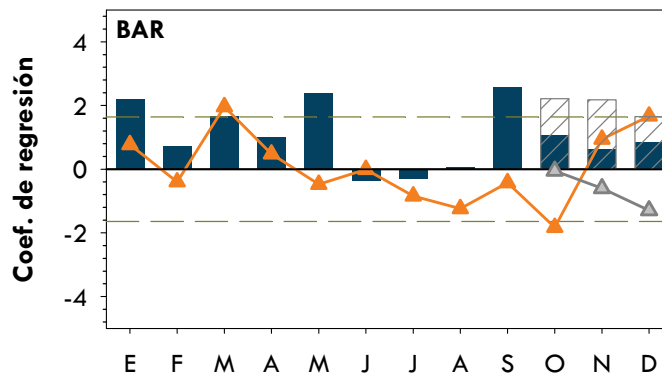
**Figura IV-13.** Cocientes de regresión parciales ( $r/std$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las tres poblaciones situadas en Menorca (Es Mercadal –MER-, Cala Biniancolla -BIA- y Cala Turqueta –TUR) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

En las tres localidades menorquinas el efecto de las PR de enero, febrero, mayo, junio y septiembre, es positivo y significativo. En BIA, además, también es significativo el efecto de las PR de marzo y abril. La relación positiva entre las precipitaciones del otoño-invierno previo a la estación de crecimiento y el grosor de los anillos es, siendo más importante en octubre-noviembre en MER (la localidad más septentrional) y más significativo en noviembre-diciembre en la población más meridional (TUR). Atendiendo a la relación positiva de las temperaturas de enero, es posible que el período de crecimiento empiece a principios de año. Asimismo, las

poblaciones menorquinas también comparten una relación negativa entre las temperaturas y el crecimiento en verano (julio en MER y septiembre en TUR y BIA). En las tres localidades, las TM de septiembre presentan una relación negativa y significativa con el crecimiento, indicando que el estrés hídrico es todavía acusado en septiembre. Según indican los valores de los cocientes de regresión parciales, el crecimiento del pino carrasco se detiene en verano (en julio en MER, y en julio y agosto en TUR y BIA). En septiembre, podría ser que los pinos de BIA, continuaran sin crecer muchos de los años (relación negativa con las TM y positiva, pero baja, con PR), mientras que en TUR, y sobretodo en MER el reinicio del crecimiento en septiembre está condicionado por las lluvias (relación positiva).



**Figura IV-14.1.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para las dos poblaciones situadas en Eivissa (St. Joan de Labritja —JOA— y Sa Talaia de St. Josep —JOS) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

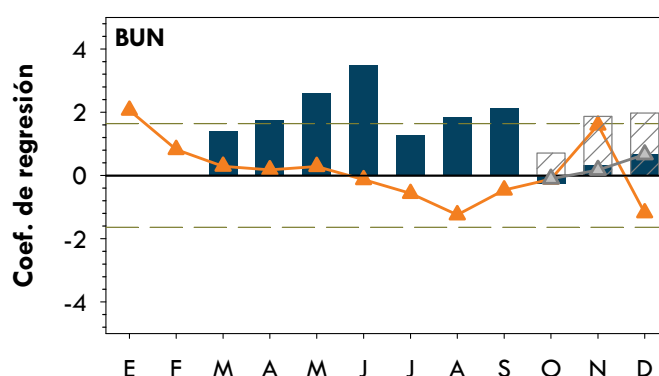


**Figura IV-14.2.** Cocientes de regresión parciales ( $r/\text{std}$ ) de las funciones respuesta obtenidas para la población situada en Formentera (Es Cap de Barbaria -BAR) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

En las dos localidades de Eivissa (JOA y JOS) el crecimiento radial del pino carrasco está limitado por las PR desde el octubre previo a la estación de crecimiento hasta junio del año en curso (Figura IV-14). Sin embargo, en Formentera (BAR), el efecto de las precipitaciones se detiene antes, en mayo, coincidiendo con el inicio del período seco en dicha localidad (Figura II-9). De esta manera, parece que el crecimiento radial del pino carrasco se detiene solamente en julio y agosto en las dos poblaciones ibicencas, mientras que en Formentera se detiene durante tres meses (desde junio hasta agosto). Las precipitaciones de septiembre están relacionadas positivamente con el grosor de los anillos de crecimiento, sobretudo en las dos localidades más meridionales y secas de las Pitiüses (JOS y BAR), dónde la relación es altamente significativa indicando que se reinicia el crecimiento radial.

Las temperaturas, por lo general, ejercen un efecto poco significativo sobre el crecimiento y en sentido inverso al que ejercen las precipitaciones. La relación es negativa desde abril hasta septiembre, encontrando su máxima influencia (valor mínimo del coeficiente de regresión) en julio, en las dos localidades ibicencas (JOA y JOS), y en agosto, en Formentera (BAR). En septiembre, al igual que en las poblaciones de Menorca, las TM tienen un efecto negativo y significativo sobre el crecimiento, indicando que el estrés hídrico es todavía considerable en este mes, sobretudo en las dos localidades más áridas (JOS y BAR). También se ha detectado una relación positiva con las TM de diciembre, posiblemente cuando termina el período de crecimiento radial en los árboles estudiados.

Por último, en la Serra de Tramuntana de Mallorca (BUN), el efecto de las lluvias es positivo desde marzo hasta septiembre del año en curso y desde octubre hasta diciembre del año previo al de crecimiento (Figura IV-15). No se ha detectado ninguna disminución considerable de los cocientes de regresión parciales que indique que el crecimiento radial se detiene en verano, aunque en julio éste es algo más bajo. El efecto de las TM de febrero es positivo y significativo; también es positivo con las de noviembre, relaciones que podrían indicar el principio y final de la estación de crecimiento, respectivamente. En agosto, la relación del crecimiento con las temperaturas es negativa (aunque sin llegar a ser significativa) indicando que el crecimiento puede estar limitado, en la Serra de Tramuntana, por las elevadas temperaturas en el mes de agosto en los años más calurosos.



**Figura IV-15.** Cocientes de regresión parciales ( $r/std$ ) de las funciones respuesta obtenidas para la masa forestal de Comuna de Bunyola (BUN, Mallorca) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales. En gris, se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Período de análisis: 1971-1999. Para más detalles, ver texto.

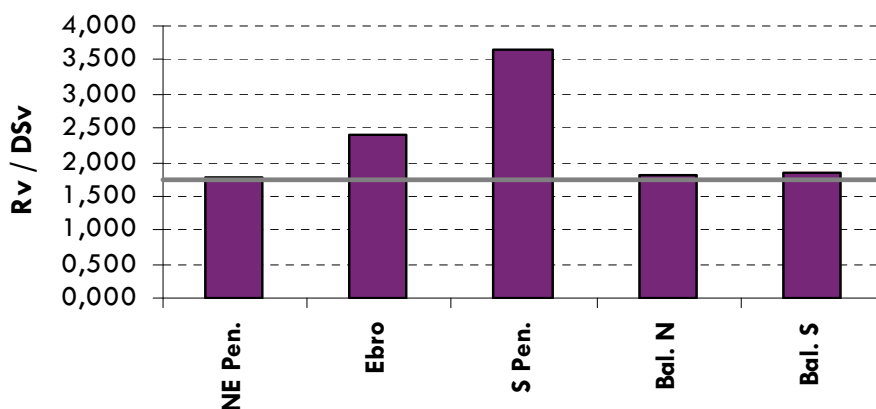
## RELACIONES CRECIMIENTO-CLIMA EN LA RED DE LOCALIDADES A ESCALA REGIONAL

Las relaciones entre el crecimiento del pino carrasco y el clima a escala regional se han establecido mediante la obtención de FR en las que, las variables independientes (predictores) han sido el promedio ponderado de las series de TM y PR de las capitales de provincia en las que se encuentran las poblaciones estudiadas. La variables dependientes, ha sido el primer componente del ACP realizado por grupos de cronologías. Los grupos considerados son los que, previamente han definido los AC (Figuras IV-1 y IV-2). Es decir, se han obtenido

cinco FR: una, para la zona del NE peninsular (donde se encuentran BAN, CER y GAR); la segunda, para la cuenca del Ebro (donde se ubican PNF, MIR, RET, y FUE); una tercera, para el sur peninsular (ARC, AYN, BYQ, MCL, ISI); la cuarta, para las tres localidades de Menorca (MER, TUR y BIA), junto con BUN (Mallorca) y, la última, para las Pitiüses (JOA, JOS y BAR).

Los modelos de FR regionales son significativos al 90% de nivel de confianza, tal y como muestra la figura IV-16, siendo más significativa la FR del grupo de localidades del sur peninsular (ARC, AYN, BYQ y MCL) y la de la cuenca del Ebro (PNF, MIR, RET y FUE) que la del NE peninsular (BAN, CER y GAR), donde el clima es más húmedo y fresco. En las Islas Baleares los cocientes de regresión de la verificación del modelo son relativamente elevados y significativos. En los modelos obtenidos, el porcentaje de varianza en el crecimiento explicado por las variables climáticas es mayor en las poblaciones más sureñas (30%) y menor en las localidades del N de las Baleares (6%). A pesar que las dos FR obtenidas para los dos grupos de las Baleares presentan cocientes de verificación similares, en las Baleares S, el porcentaje de varianza explicada por el modelo es mayor (11%).

En general, en las FR regionales (Figura IV-18), se mantienen los resultados obtenidos en las locales y; a pesar que se pierden algunas de las variables que afectaban el crecimiento significativamente, este análisis sintetiza de forma mucho más clara cómo varía el patrón de crecimiento radial del pino carrasco según las condiciones climáticas.



**Figura IV-16.** Representación de la significación global de las funciones respuesta regionales con los datos de precipitación y temperatura mensuales para el período 1949-1999. Las barras representan el cociente entre los cocientes de correlación múltiple de la regresión obtenidos para la verificación y su desviación estándar para cada cronología. Para más detalles, ver texto y metodología.

En el NE peninsular se mantiene el patrón de crecimiento radial bimodal detectado con los registros de los dendrómetros y con las FR locales, el cual tiene el máximo de crecimiento de primavera centrado en mayo-junio y, el de otoño, en septiembre. Dicha bimodalidad viene marcada por la débil relación del crecimiento

con las temperaturas y precipitaciones en julio y agosto. También se mantiene el efecto significativo de las temperaturas al inicio (febrero) y al final (noviembre) de la estación de crecimiento (relaciones positivas). En el modelo obtenido a escala regional, se ha perdido el efecto positivo que tenían en las FR locales las lluvias del otoño e invierno previos a la estación de crecimiento (cocientes de regresión de las PR más bajos).

La FR obtenida para el conjunto de cronologías de la cuenca del Ebro es similar a la de las localidades del NE (Figura IV-17) y, según los valores de los cocientes de regresión de las TM, la estación de crecimiento también empieza en febrero y termina en noviembre. Las lluvias restringen el crecimiento desde marzo hasta junio y en octubre y noviembre, correspondiéndose con los dos períodos de máximo crecimiento. Los bajos cocientes de regresión en los meses de julio, agosto y septiembre, indican que el período de reposo estival seguramente es más largo que en el NE peninsular, donde tan sólo se detiene en julio y agosto (Figura IV-17). Es muy probable que el crecimiento se detenga durante estos tres meses debido, tanto a la falta de agua como a las elevadas temperaturas estivales. Por otro lado, en la cuenca del Ebro el efecto de las temperaturas es en general poco acusado (bajos  $r/ds$ ), pese al efecto positivo que tienen las TM invernales previas a la estación de crecimiento (diciembre y enero). Este resultado indica que es relativamente habitual que el severo frío invernal determine un menor crecimiento del pino carrasco en el interior peninsular.

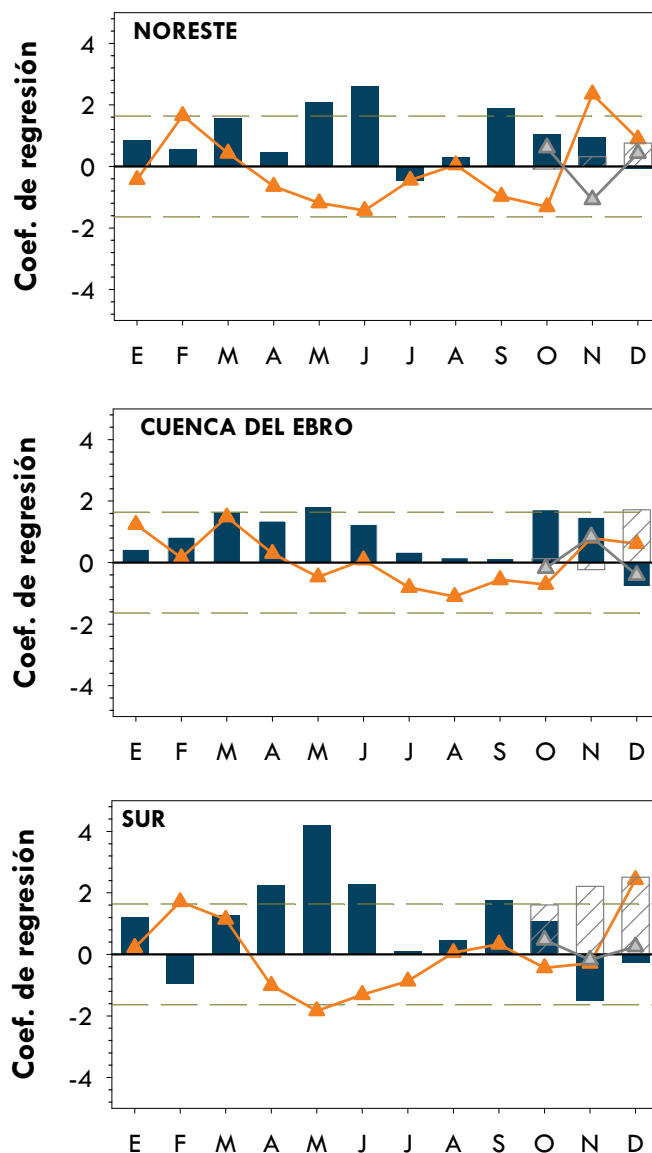
En las localidades del sur peninsular (Figura IV-17) el crecimiento del pino carrasco está esencialmente limitado por: (i) las precipitaciones de primavera (abril, mayo y junio), las de septiembre y las del otoño-invierno (octubre, noviembre y diciembre) previos a la estación de crecimiento; y (ii) las elevadas temperaturas desde mayo hasta agosto. En verano, el crecimiento radial seguramente se detiene a causa de la falta de agua y las elevadas temperaturas. Finalmente, destaca el efecto positivo de las temperaturas al inicio (febrero-marzo) y final (diciembre) del período de crecimiento.

En el grupo de localidades de las Baleares N, el perfil de los cocientes de regresión parciales para las PR mensuales es muy parecido al obtenido para las cronologías del NE peninsular (destacando el efecto positivo de las PR de mayo-junio y septiembre), deteniéndose también el crecimiento en julio y agosto por término medio. Sin embargo, el efecto de las lluvias de diciembre y enero previos a la estación de crecimiento es mayor. El efecto de las temperaturas es leve, aunque, al igual que en NE peninsular, éstas determinan el principio y el final de la estación de crecimiento (relación positiva en enero y diciembre), la cuál es más larga en el N de las Baleares.

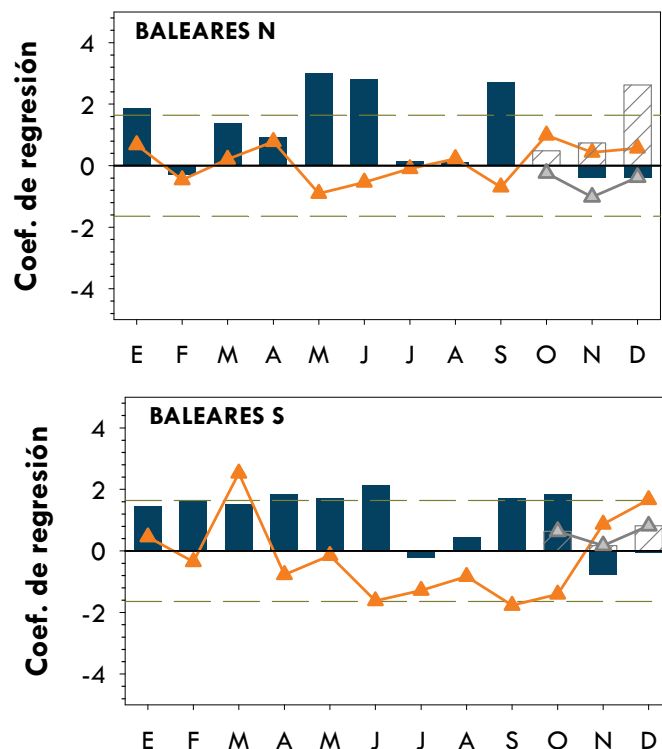
Por último, en las localidades de las Pitiüses (Baleares S) el crecimiento está restringido por las lluvias durante todo el año, excepto en julio y agosto, cuando muy probablemente, el crecimiento radial del pino carrasco se detiene debido a las elevadas temperaturas y a la falta de agua. Esta interpretación encuentra amparo en los elevados cocientes de regresión negativos obtenidos para las temperaturas desde junio hasta octubre. Finalmente, el efecto positivo de las TM de enero (diciembre) indica que, muy probablemente, el aumento (la disminución) de éstas al



principio (a finales) del año, determinan el inicio (fin) de la estación de crecimiento. Este resultado coincide con el obtenido en las localidades del sur de la Península, mientras que en las del norte (NE y cuenca del Ebro) parece que son las temperaturas de noviembre las que determinan el cese del crecimiento radial.



**Figura IV-17.1.** Cocientes de regresión parciales de las FR obtenidas para las cronologías regionales definidas previamente (ver figuras III-18 y III-19) con los datos de precipitación (barras) y temperatura (triángulos) mensuales para el período 1949-1999. En gris se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Para más detalles, ver texto.



**Figura IV-17.2.** Cocientes de regresión parciales de las FR obtenidas para las cronologías regionales definidas previamente (ver figuras III-18 y III-19) con los datos de precipitación (barras) y temperatura (triángulos) mensuales para el período 1949-1999. En gris se presentan los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente). Para más detalles, ver texto.

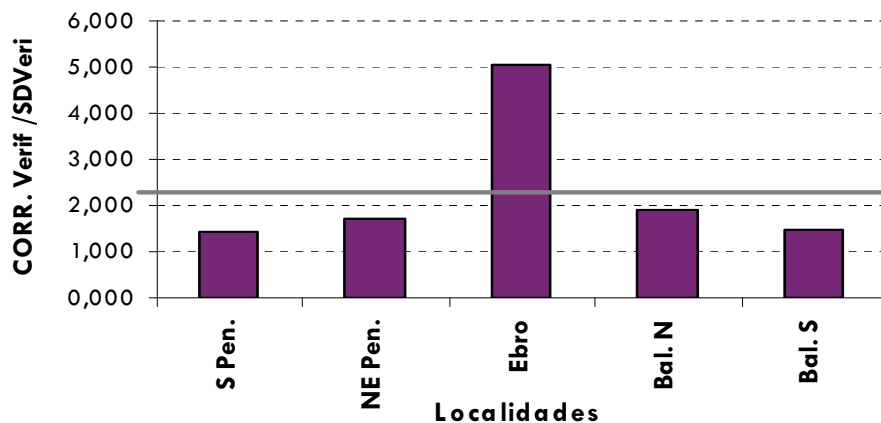
## SEÑALES CLIMÁTICAS DE ÁMBITO GLOBAL (teleconexiones) CONTENIDOS EN LAS SERIES DE CRECIMIENTO RADIAL DEL PINO CARRASCO

En los apartados anteriores se ha visto que, si bien el crecimiento radial del pino carrasco responde a las condiciones climáticas locales, especialmente a la disponibilidad de agua, el crecimiento de las 27 poblaciones estudiadas también presenta un elevado porcentaje de variabilidad común en el crecimiento radial, parte del cual (entre un 6% y un 30%, según la región) puede explicarse por las series de TM y PR a escala regional. Además, los resultados obtenidos a escala regional, exhiben más claramente las diferencias en el patrón de crecimiento del pino carrasco a lo largo de su área de distribución en España. No obstante, desconocemos en qué medida dicho componente regional se relaciona con fenómenos de circulación atmosférica de escala global. Con dicho propósito, se han

analizado las relaciones entre el crecimiento del pino carrasco y distintos índices de fenómenos de circulación atmosférica que tienen una influencia sobre el clima en amplias regiones del planeta (teleconexiones). Para ello, se han calculado correlaciones de *Spearman* y se han establecido FR utilizando como variables dependientes, las series del grosor de los anillos de crecimiento regionales (NE peninsular, cuenca del Ebro, S peninsular, Baleares N y Baleares S) y, como predictores, los índices de las teleconexiones que, según la literatura, ejercen una mayor influencia en la región mediterránea (NAO, SO, MO, WeMO).

Los resultados obtenidos en el análisis de correlaciones son muy similares a los de las FR. En todas las poblaciones se ha hallado una correlación significativa y positiva entre el NAO (t-1 y t-2) del invierno y el crecimiento de los árboles, especialmente en el norte peninsular (NE y cuenca del Ebro). El índice de la MO en invierno, también se correlaciona (aunque negativamente) de forma significativa con el crecimiento radial del pino carrasco con dos años de desfase. La SO, se relaciona positivamente con el crecimiento de las poblaciones de la cuenca del Ebro del mismo año, y con el de las del sur de la Península con uno y dos años de desfase. Dichas relaciones son más significativas en primavera y otoño. Finalmente, el índice de la WeMO es, con diferencia, el que mejor se relaciona con el crecimiento del pino carrasco del año en curso, sobretodo en las poblaciones ubicadas en las Islas Baleares y en las del sur de la Península. El efecto es negativo en primavera, positivo en verano y, negativo en el invierno previo al crecimiento.

$$\text{Correl. Verif.} / \text{STD Verif. de las FR. CREIC.} = \text{F(SOI.1969-99)}$$



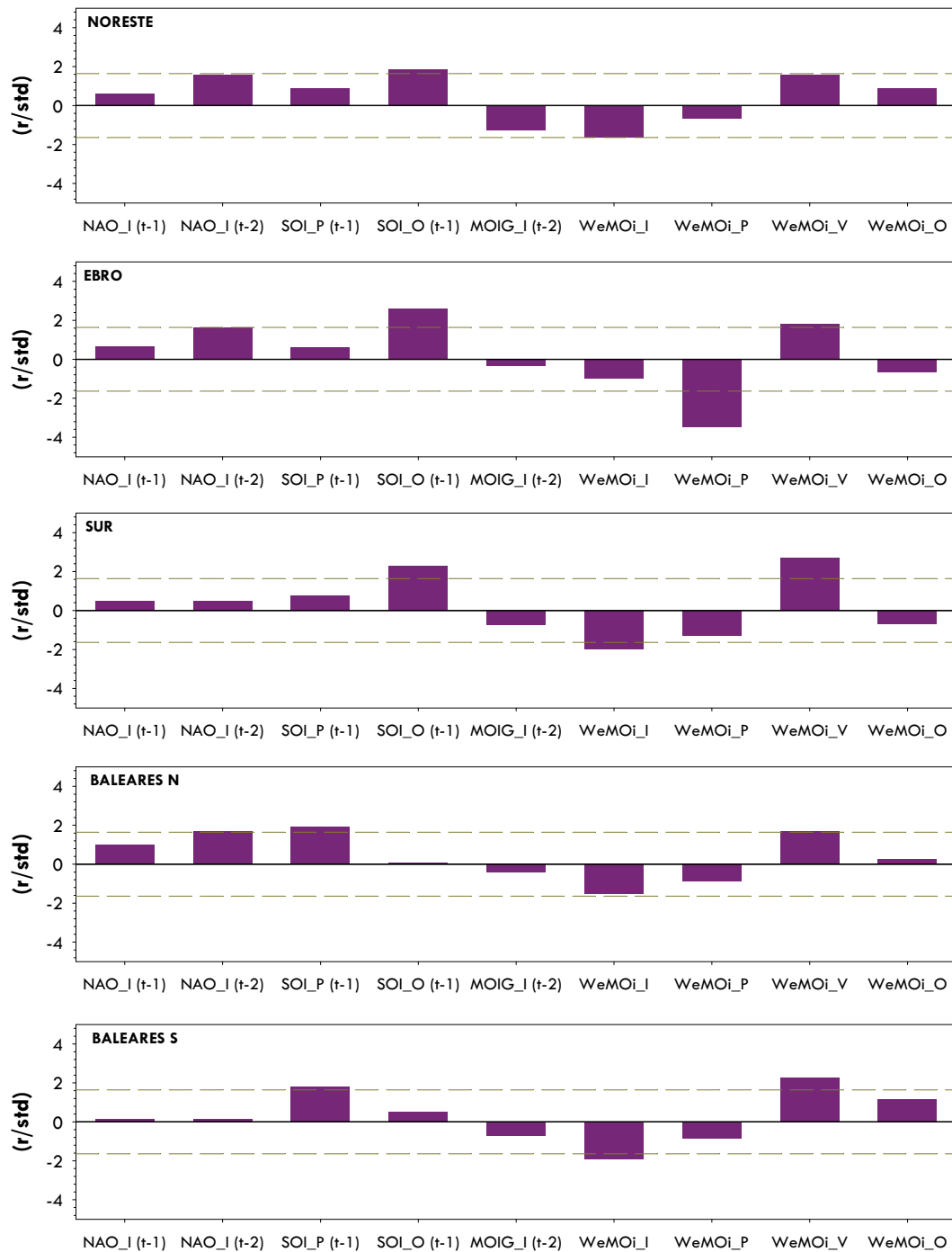
**Figura IV-18.** Representación de la significación global de los modelos de regresión ajustados (Figura III-17) a las distintas cronologías regionales definidas previamente mediante análisis multivariantes (ver figuras III-15 y III-18) con los datos de precipitación y temperatura mensuales para el período 1949-1999. Las barras representan el cociente entre los cocientes de correlación múltiple de la regresión obtenidos para la verificación y su desviación estándar para cada cronología. Para más detalles, ver texto.

A modo de síntesis, las FR definitivas solamente han considerado como variables independientes, aquellos índices de teleconexiones estacionales que han presentaban alguna relación significativa en los análisis de correlaciones o FR

preliminares (realizados usando todos los valores estacionales de un mismo índice del año en curso (t), y de uno (t-1) y dos años (t-2) antes; n=12 predictores). Los cocientes de regresión globales de la verificación de los modelos obtenidos se presentan en la figura IV-18. De los cinco modelos, solamente son significativos los obtenidos para la región norte de la Península Ibérica (NE y Ebro) y el norte de las Islas Baleares. En el sur, tanto de la Penínsulas como de las Baleares, los cocientes de regresión de la verificación del modelo, aunque son elevados, no llegan al nivel de significación del 90%. El porcentaje de varianza explicada por los modelos de las FR oscila entre el 2,15% en las Baleares norte y el 13,40% en el NE peninsular, siendo en promedio de 4,85%.

Las FR obtenidas (Figura IV-19), muestran que la sincronía en el crecimiento del pino carrasco está estrechamente relacionada con la oscilación en el Mediterráneo occidental (WeMO), especialmente durante el verano y sin existir ningún desfase temporal entre ambas variables. Esta relación es especialmente significativa en las poblaciones del sur (Baleares y sur peninsular). De esta manera, cuando el índice presenta valores positivos en verano, el crecimiento del pino carrasco es mayor, resultado que (atendiendo a los resultados de las FR locales y regionales) nos conduce a pensar que en la fase positiva de la WeMO, el gradiente de presión debería contribuir a un aumento en la pluviometría y/o a un descenso de las temperaturas. De hecho, Dünkeloh y Jacobeit (2003) han relacionado el reforzamiento del modo positivo de la oscilación del Mediterráneo con un aumento de las PR en primavera. Por otro lado, la relación en invierno entre el índice de la WeMO y el crecimiento es también inversa (negativa). Resultado coherente con la relación significativa entre el índice de la WeMO y las bajas precipitaciones en invierno (Martín-Vide 2004, López-Bustins y Azorin-Molina 2005). No obstante, en la cuenca del Ebro, dicha relación inversa es mucho más fuerte en primavera que en invierno. Este resultado, está de acuerdo con las FR locales obtenidas, puesto que en las tres localidades ubicadas en las provincia de Zaragoza (PNF, MIR y RET) y también en el interior de València (ISI), el efecto negativo de las precipitaciones invernales (especialmente las de enero) sobre el crecimiento en grosor del pino carrasco es considerable y significativo.

También se ha encontrado una relación positiva entre el crecimiento radial del pino carrasco y el índice NAO (t-2) en el norte (NE, cuenca del Ebro y Baleares norte). Numerosos estudios revelan el efecto que la NAO ejerce sobre las temperaturas invernales de gran parte del Hemisferio Norte; y en concreto, en la región mediterránea el efecto que tiene sobre las temperaturas (Rodwell *et al.* 1999, Hurrell *et al.* 2001, Marshall *et al.* 2001, Trigo *et al.* 2002) y precipitaciones (Zorita *et al.* 1992, Hurrell 1996, Rodó y Rodríguez-Arias 2005) de invierno. A pesar de ello, no se ha encontrado ninguna cita en la bibliografía que relacione estas variables con la NAO con dos años de desfase. Sin embargo, Pons (2002), en un estudio dendroclimatológico de *P. halepensis* y *P. pinea* en Menorca y las Pitiüses, también encontró relaciones positivas y significativas con la NAO con dos años de desfase. Esta relación con dos años de desfase podría relacionarse con la variabilidad con período casi bianual que encontraron Hurrell *et al.* (2003); no obstante, los resultados que obtuvieron no fueron significativos.



**Figura IV-19.** Funciones respuesta finales de las cinco cronologías regionales del pino carrasco establecidas con la combinación de los índices de las teleconexiones previamente seleccionados por presentar relaciones significativas con alguna de las cronologías. P, indica primavera; V, verano; O, otoño; e I, invierno; t indica el año en curso, t-1, el año anterior al de crecimiento, y t-a, dos años antes al de formación del anillo. Para más detalles, ver texto. Las líneas horizontales discontinuas indican el umbral del 90% de nivel de confianza.

En la Península (NE, cuenca del Ebro y sur) se ha detectado una relación positiva entre el crecimiento y el índice de la SO en los meses de otoño del año previo al de crecimiento; mientras que en las Baleares la relación positiva se ha detectado en la primavera del año previo. Estos resultados coinciden con los de Ropelewski y Halpert (1987), quienes constatan la influencia que la ENSO ejerce sobre el clima en la región mediterránea, demostrando la existencia de una relación positiva entre éste y las lluvias caídas desde abril hasta noviembre. Las relaciones más fuertes las encuentran en primavera y otoño coincidiendo con los dos máximos pluviométricos, (Quadrelli *et al.* 2001, Mariotti *et al.* 2002). Guijarro (1997) encontró una correlación significativa entre la serie anual del número total de lluvias fuertes (precipitación superior a 60 mm) en las regiones mediterráneas españolas y el índice de la SO del año anterior, si bien la escasa varianza explicada invalidaba dicho índice como predictor estadístico útil. Las diferencias encontradas entre la Península y las Baleares podrían indicar que la influencia de la SO sobre las precipitaciones de otoño en las Baleares podría ser más débil que en la Península, mientras que en primavera la situación sería opuesta. No obstante, el efecto del SOi en primavera, también es considerable (aunque no significativo) en la Península.

Finalmente, el desfase en la relación entre el SOi y el crecimiento, está de acuerdo con los resultados obtenidos por Rodó *et al.* (1997), quienes detectan que el retraso entre el principio del ENSO en invierno y el momento en el que se hace patente en la Península oscila entre 3 y 21 meses, teniendo su máximo efecto en la primavera del año siguiente. Estos retrasos también coinciden con los detectados por Horel y Wallace (1981) y Ropelewski y Halpert (1987, 1989).

## **ESTABILIDAD TEMPORAL DE LAS RELACIONES CRECIMIENTO-CLIMA**

La estabilidad temporal de las relaciones crecimiento-clima se ha contrastado mediante la obtención de FR para períodos de 30 años con 10 años de desplazamiento entre sí. De esta manera, los intervalos de tiempo considerados han sido 1950-1979, 1960-1989 y 1970-1999. Dicho análisis se ha realizado a escala local y regional.

En la tabla IV-2 se han esquematizado los resultados obtenidos en el análisis a escala local (es decir, estableciendo las FR para las localidades que presentan series de datos suficientemente largos para realizar dicho análisis). Las FR obtenidas con las series regionales no son significativas (menos del 66% de nivel de confianza). Asimismo, el número de variables climáticas que presentan cocientes de regresión parciales significativos es muy bajo. Como consecuencia, no se ha podido contrastar la estabilidad temporal de las relaciones crecimiento-clima a escala regional (resultados no mostrados). La baja significación de los modelos puede atribuirse, en parte, al aumento en la variabilidad de las series de crecimiento que causa la ampliación de la escala espacial de análisis, ya que al aumentar la variabilidad en las series de crecimiento (variable dependiente), el

porcentaje de varianza explicada por cada cociente de regresión parcial es menor. Una solución podría ser aumentar la longitud de las series temporales (series de crecimiento y datos climáticos). No obstante, los resultados del análisis temporal realizado escala regional son coherentes con los obtenidos a escala local.

Tal y como ilustra la tabla IV-2, la significación de los modelos obtenidos para las localidades de cuenca del Ebro (FUE, MIR y RET) y en BYQ aumenta a lo largo de los últimos 50 años, mientras que en las Baleares sur (JOA, JOS y BAR) parece que disminuye. Dicho de otro modo, el efecto del clima sobre el crecimiento en grosor del pino carrasco en España ha cambiado en las localidades con climas más extremos, aumentando en las poblaciones que presentan una continentalidad más marcada (cuenca del Ebro y BYQ), y disminuyendo en las más áridas y cálidas (sur de las Baleares).

Los resultados muestran que, en general, el efecto de las PR ha sido, a lo largo del último medio siglo, mucho más importante para el crecimiento radial de *P. halepensis* que las TM, destacando el aumento del efecto de las TM en marzo, cuando todavía no se produce estrés hídrico.

En el norte de las Baleares, ha aumentado el efecto de las temperaturas de enero, indicando que el período de crecimiento podría haberse alargado en los últimos 50 años debido al aumento en las TM. En cambio, en el sur de las Baleares se ha detectado un aumento del efecto positivo de las temperaturas de diciembre; resultado que indica un posible alargamiento del período de crecimiento a lo largo del último medio siglo. También ha aumentado la relación significativa de las PR de enero en el sur de las Baleares.

El efecto negativo de las TM en julio ha disminuido en FUE y MIR (cuenca del Ebro), de manera que en la actualidad, el crecimiento del pino carrasco no se ve afectado por las elevadas TM de verano. Este resultado denota que probablemente el crecimiento se detiene, en la actualidad, un mes antes; sin embargo, en el sur de la Península parece que este efecto se ha mantenido. Las PR de verano, en general, no aparecen en los modelos obtenidos, indicando que el crecimiento ya se detenía a mediados de siglo a causa de la aridez. No obstante, en dos de las tres localidades de Menorca, se ha detectado una clara disminución del efecto de las lluvias en agosto. Este resultado, podría indicar, que en los últimos años el crecimiento radial del pino carrasco se detiene con mayor frecuencia que a mediados de siglo XX.

El aumento generalizado del efecto de las lluvias de septiembre tanto en el NE peninsular como en el norte de las Baleares podría indicar que el estrés hídrico estival ha aumentado a lo largo de la segunda mitad del s. XX en estas regiones (las que presentan un clima menos árido de la red estudiada).

En el sur de la Península, se ha detectado una disminución del efecto de las TM del diciembre previo a la estación de crecimiento, resultado que indicaría que éstas ejercen menos efecto en la actualidad sobre la acumulación de reservas para el crecimiento del año siguiente.

Por último, se ha detectado un aumento del efecto de las PR del diciembre previo a la estación de crecimiento en las localidades del valle del Ebro, indicando que el aumento de temperaturas (que se ha producido sobretodo en las TMI), podría haber causado un aumento en el período de crecimiento del pino carrasco, de manera que en las últimas décadas del siglo XX, termina en diciembre, en lugar de finalizar en noviembre.



## SINTEISIS

Según los resultados obtenidos (RDA), la respuesta a las condiciones climáticas de los bosques de pino carrasco depende en gran medida de la densidad de la masa forestal y del tipo de vegetación arbustiva, variables que, a su vez, mantienen una relación negativa entre sí. Todos estos resultados sugieren que la competencia entre individuos o, entre éstos y la vegetación arbustiva (que en los pinares de pino carrasco puede llegar a estar muy desarrollada), condicionan el crecimiento de los árboles distorsionando los efectos que las condiciones climáticas ejercen sobre su crecimiento radial y, por lo tanto, la interpretación de los resultados obtenidos en estudios dendroclimáticos realizados en masas forestales densas (de más de 825 pies/ha) debe realizarse con extrema cautela. Acorde con este resultado, en las localidades con densidades poblacionales superiores a los 1000 pies/ha (LLA, QRL y MTS), no se ha podido obtener un modelo significativo (90% de nivel de confianza) que relacione el grosor de los anillos de crecimiento con las variables de TM y PR mensuales; y en las masas forestales con áreas basales muy altas (que superan los 36,00 m<sup>2</sup>/ha) y densidades forestales relativamente elevadas (BAN, MAI y ENG), las FR locales presentan una significación global elevada, sin llegar a ser significativa. Por otro lado, en GDM Y TUR, la FR obtenida es muy poco significativa seguramente como consecuencia de las severas condiciones del entorno en el que viven estos árboles, de entre las cuales destaca el tipo de suelo (dunas de arena) y el efecto dañino de la brisa marina sobre los árboles.

Las relaciones crecimiento-clima basadas en variables climáticas sencillas como por ejemplo las precipitaciones y temperaturas medias mensuales, han demostrado reflejar, de forma bastante adecuada, el efecto de las condiciones climáticas sobre el crecimiento radial del pino carrasco y su capacidad de adaptación a las mismas, tanto espacial como temporalmente. No obstante, estos resultados podrían perfeccionarse mediante la medición de algunas relaciones isotópicas en los anillos de crecimiento, que podrían ser mejores indicadores de las relaciones crecimiento-clima ya que proporcionan una señal climática más robusta en relación con el estrés hídrico de la vegetación. Por otro lado, la inclusión en los modelos de parámetros que describan con mayor precisión el balance de agua en el suelo a lo largo del año, muy probablemente, aumentaría el porcentaje de variabilidad explicada por las funciones respuesta.

No obstante, atendiendo al número localidades de la red en las que, según las FR locales, las PR y TM mensuales afectan significativamente el crecimiento radial, se ha obtenido el patrón medio de crecimiento del pino carrasco en España. Todos los resultados obtenidos muestran que, el crecimiento radial del pino carrasco en el este de la Península Ibérica e Islas Baleares está esencialmente limitado por las PR, aunque en algunos meses las TM ejercen un efecto considerable. A modo de resumen, los resultados, acorde con el patrón extraído a partir de las tasas de crecimiento registradas por los dendrómetros en el NE Peninsular (Garraf), que confirman que:

- (i) El inicio del crecimiento radial depende de que las temperaturas sean elevadas en febrero y, las precipitaciones, abundantes en marzo. No

obstante, la radiación solar y el fotoperíodo también determinan el inicio del período de crecimiento (resultados derivados de las relaciones entre las condiciones climáticas y las tasas de crecimiento diarias en el Garraf, Capítulo I).

- (ii) El efecto de las precipitaciones es especialmente notable en primavera (principalmente en mayo) y en otoño (septiembre), de manera que, muy probablemente, influyan de forma positiva en las tasas máximas de crecimiento radial.
- (iii) La falta de agua junto con las elevadas temperaturas en julio provocan una disminución o incluso el paro del crecimiento radial del pino carrasco en verano (especialmente en agosto).
- (iv) En noviembre, cuando las temperaturas no son suficientemente elevadas y *P. halepensis* termina su crecimiento radial, es cuando acumula más reservas.

El patrón general de las FR obtenido en las Islas Baleares es muy similar al de las localidades Peninsulares. Sin embargo, merece destacar:

- (i) El masivo efecto positivo de las precipitaciones desde el octubre-noviembre previo a la estación de crecimiento hasta junio y septiembre del año en curso.
- (ii) La mayor duración del período de crecimiento (empieza en enero en lugar de febrero, y termina en diciembre (en lugar de noviembre), el cuál está estrechamente relacionado con las TM.

Mediante la aplicación de técnicas multivariantes (PCA, RDA y AC) se ha detectado la existencia de cuatro grupos de poblaciones en la Península según la respuesta del crecimiento radial al clima (PR y TM mensuales): uno, formado por los cinco bosques situados en el sur e interior peninsular (ARC, AYN, BYQ, ISI y MCL); otro, constituido por las tres localidades catalanas más septentrionales (BAN, CER, GAR); el tercero, compuesto por las localidades catalanas con un clima más continental (LLA, QRL, MTS); y el último, integrado por los cuatro bosques situados en la cuenca del Ebro (PNF, MIR, RET, FUE) junto con ENG (situada en el interior de València). GDM y MAI, atendiendo a los resultados obtenidos, presentan unas relaciones crecimiento-clima singulares y poco significativas. En las Islas Baleares, estos análisis han resaltado la clara diferenciación existente entre la respuesta a las condiciones climáticas de los pinos de Menorca y la de los de las Pitiüses.

El período de crecimiento radial del pino carrasco en las tres localidades más septentrionales (BAN, CER y GAR) está fuertemente condicionado por las TM; dicho período empieza en febrero y termina en noviembre. El patrón de crecimiento, en estas localidades, presenta una clara bimodalidad debido a los elevados cocientes de regresión parciales de mayo y septiembre y al nulo efecto del clima en julio y agosto. El efecto de las TM es generalmente opuesto al de las PR, indicando que su efecto sobre el crecimiento se basa en el aumento del estrés

hídrico que causan las temperaturas en el árbol (aumento de la evapotranspiración).

En ninguna de las tres poblaciones de la Catalunya interior (LLA, QRL y MTS) se ha podido obtener un modelo significativo. Por consiguiente, los resultados obtenidos en las FR deben interpretarse meramente como indicativos. Éstos, parecen indicar que, excepto en la localidad más continental (QRL), el efecto positivo de las PR de septiembre desaparece y aparece el efecto positivo de las lluvias de verano.

En las localidades de la Depresión del Ebro, según los resultados obtenidos, el crecimiento del pino carrasco se detiene al empezar la sequía estival y se reinicia con las lluvias de otoño, siendo así más acusado el patrón bimodal del pino carrasco. El efecto significativo y positivo de las lluvias del otoño previo a la estación de crecimiento es considerable. Las TM, aunque presentan una relación poco significativa con el crecimiento, suelen mantener una relación positiva con éste durante la primera mitad del año (hasta junio) y una relación negativa, durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre. No obstante, al igual que en las tres poblaciones de la Catalunya interior, el crecimiento radial del pino carrasco se ve afectado negativamente por las bajas temperaturas invernales. Finalmente, el período de crecimiento empieza en febrero y termina en noviembre, atendiendo al efecto positivo de las temperaturas en estos meses.

En las poblaciones del sur de la Península, el crecimiento del pino carrasco también está limitado esencialmente por las lluvias (mantienen su efecto positivo desde febrero hasta diciembre). No obstante, las precipitaciones de octubre, noviembre y diciembre están más estrechamente relacionadas con el crecimiento radial del año siguiente. En las cinco localidades, se ha detectado una relación negativa entre las temperaturas de julio y el crecimiento radial, y una relación muy baja de las variables climáticas y el crecimiento en agosto (excepto en BYQ, la localidad ubicada a mayor altitud, 1.280 m snm.). El efecto positivo de las temperaturas de diciembre, sobretudo en las poblaciones más sureñas, hace pensar que el crecimiento radial del pino carrasco en este grupo de localidades termina en diciembre, siendo la estación de crecimiento un mes más larga que en las poblaciones estudiadas en el norte peninsular.

En las tres localidades menorquinas, el efecto de las precipitaciones del otoño-invierno previo a la estación de crecimiento es elevado y positivo, siendo más importante en octubre-noviembre en MER (la localidad más septentrional) y más significativo en noviembre-diciembre en la población más meridional (TUR). Atendiendo al efecto positivo de las temperaturas de enero, es posible que el período de crecimiento empiece a principios de año en las tres poblaciones estudiadas. La detención del crecimiento en verano no sólo se relaciona con la falta de agua (PR) sino también con las TM (efecto negativo). La duración del paro en verano es más larga en las localidades más sureñas de la isla que en MER. En las tres localidades, el reinicio del crecimiento en septiembre está condicionado por el descenso de las temperaturas en otoño (relación negativa y significativa) y las precipitaciones de septiembre (relación positiva).

El crecimiento radial del pino carrasco se detiene solamente en el mes de

agosto en las dos poblaciones de Eivissa, mientras que en Formentera se detiene desde junio hasta agosto. Las precipitaciones de septiembre están relacionadas positivamente con el grosor de los anillos de crecimiento, sobretodo en las dos localidades más meridionales y secas de las Pitiüses (JOS y BAR). Las temperaturas, por lo general, ejercen un efecto poco significativo sobre el crecimiento y en sentido inverso al que ejercen las precipitaciones. También se ha detectado una relación positiva con las TM de enero, cuando posiblemente empieza el crecimiento radial, y en diciembre, cuando posiblemente termina el período de crecimiento radial de los árboles estudiados.

Finalmente, en la población de la Serra de Tramuntana (Mallorca), no se ha detectado ninguna disminución considerable de los coeficientes de regresión parciales que indique que el crecimiento radial se detenga en verano, aunque en julio éste es algo más bajo. El efecto de las temperaturas de febrero es positivo y significativo, al igual que las de noviembre. En agosto, la relación del crecimiento con las temperaturas, aunque no llega a ser significativa, es negativa, indicando que el crecimiento puede estar limitado por las temperaturas estivales en los años más calurosos.

En el análisis de las relaciones crecimiento-clima a escala regional, se mantienen los resultados obtenidos con las series locales y, a pesar que se pierden algunas de las variables que afectaban el crecimiento significativamente, este análisis sintetiza de forma mucho más clara cómo varía el patrón de crecimiento radial del pino carrasco según las condiciones climáticas. Atendiendo a la significación de los modelos obtenidos, las localidades del sur de la Península y las de la cuenca del Ebro son las que presentan una mayor sensibilidad a las condiciones climáticas regionales. A modo de resumen, los resultados indican que el período seco estival, en general, se produce en los meses de julio y agosto, pero en las localidades más áridas (sur de las Baleares), éste se alarga hasta septiembre de forma habitual. Se ha detectado un aumento de la duración del período de crecimiento de acuerdo con las temperaturas más elevadas en las Baleares y en el sur de la Península, de manera que en el NE y en la cuenca del Ebro éste, empieza en febrero y termina en noviembre, mientras que en el sur de la península, aunque se inicia también en febrero, no termina hasta diciembre. En las Baleares empieza en enero y termina en noviembre (en el norte) y en diciembre (en el sur).

Los resultados obtenidos, indican que el crecimiento de esta especie es muy sensible a las condiciones climáticas locales (PR y TM). No obstante, la variabilidad explicada a escala regional es muy elevada (entre un 6% y un 30%), y entre un 2% (N de las Baleares) y un 13% (NE peninsular) de la variabilidad el crecimiento radial del pino carrasco a escala regional se relaciona con los fenómenos de circulación atmosférica a escala global. De todas las teleconexiones analizadas (NAO, SO, MO y WeMO), ésta última es la que mejor se relaciona con el crecimiento radial del pino carrasco. Su relación es negativa en invierno (siendo menos importante en el NE peninsular) y primavera (especialmente en la cuenca de Ebro y en el sur de la Península), y positiva en verano (en todo el territorio español). También existe una cierta influencia positiva de la SO en primavera y otoño con un año de decalaje, así como una relación positiva entre el NAO y el crecimiento radial del pino carrasco en invierno con dos años de desfase.

Por último, el análisis temporal de las relaciones crecimiento-clima ha indicado que, en general, existe una cierta tendencia a aumentar el efecto positivo de las lluvias en primavera y otoño (cuando se producen los dos máximos de crecimiento), y una disminución del efecto de éstas en los meses de verano. Este resultado, de acuerdo con los obtenidos en el análisis de tendencias climáticas, podría indicar que el alargamiento del período seco estival, probablemente se traduzca en un alargamiento del intervalo en el que se detiene el crecimiento radial del pino carrasco a causa del estrés hídrico.