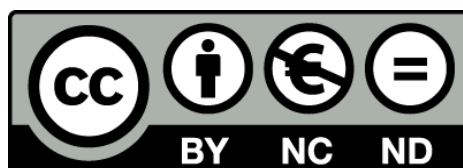


**Dendroecologia de *Pinus halepensis* Mill.
en Este de la Península Ibérica e Islas Baleares:
Sensibilidad y grado de adaptación
a las condiciones climáticas**

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



METODOLOGÍA

RED DE LOCALIDADES DE *PINUS HALEPENSIS* MILL.

Descripción general

Se ha establecido una red de 27 localidades de estudio distribuidas a lo largo del este peninsular e Islas Baleares. En la figura 2 se muestran el área de distribución del pino carrasco en España y la situación de los 27 bosques objeto de estudio. En la tabla 1 se detalla la situación y características fisiográficas generales de cada uno de ellos.

De las 27 poblaciones de *P. halepensis*, 9 están situadas en las Islas Baleares y 18, en la Península Ibérica (Figura 2). En las Islas Baleares, acorde con el objetivo dendroclimático del presente proyecto, la densidad de la red de localidades es mayor, debido a que el gradiente climático de aridez, es también más intenso. De manera que, en cada isla, se han establecido dos o tres localidades lo más distantes posible entre sí. En Menorca, se han muestreado los bosques de Es Mercadal (MER), Cala Biniancolla (BIA) y Cala en Turqueta (TUR); en Mallorca, las poblaciones ubicadas en Comuna de Bunyola (BUN), el Santuari de Bonany (BON) y en la Cala de Mondragó (MON); en Eivissa, se muestrearon Sa Talaia de Sant Josep (JOS) y Sant Joan de Labritja (JOA); y en Formentera, se estudiaron los árboles situados en Es Cap de Barbaria (BAR).

En la Península Ibérica, las 18 localidades se reparten en dos grandes zonas: 10 en el norte y 8 en el sur. Las localidades del norte se sitúan a lo largo de la Cordillera Prelitoral catalana (de norte a sur) y de la cuenca del Ebro. En cambio, en el sur, las localidades quedan más inconexas entre ellas, puesto que el área ocupada por la especie en esta región también está, exceptuando las sierras alicantinas, mucho más fragmentada.

En las elevaciones orográficas que rodean la cuenca del Ebro se han estudiado cuatro bosques: dos situados en la Sierra de Alcubierre (Miramón -MIR- y Vedado de Peñaflor -PNF), uno en los Monegros (La Retuerta de Pina -RET); y el cuarto, en un valle interior cercano a la base de la cuenca (Fuentespalda -FUE). En el litoral catalán, se han estudiado seis poblaciones: una en la mancha más septentrional de pino carrasco en la Península, Banyoles (BAN); tres en la provincia de Barcelona (Garraf -GAR-, Cervelló -CER- y la Llacuna -LLA-); y dos en la de Tarragona (Montsant -MTS- y Querol -QRL-). En la Comunidad Valenciana se han estudiado cuatro poblaciones: la más septentrional, Los Isidros (ISI), se encuentra en las llanuras del río Gabriel; y la más meridional, en Guardamar del Segura (GDM). Entre ambas, se encuentra la localidad de la Serra de Enguera (ENG) y la de la Serra de Maigmó (MAI). En la provincia de Murcia se ha estudiado una población situada en la Sierra de Archivel (ARC) y, dentro de la provincia de Albacete, el bosque estudiado se encuentra cerca de la Sierra de Alcaraz (AYN). Las dos localidades estudiadas más meridionales están situadas en Granada (El Mencil -MCL-) y en Almería (Pinar de Bayarque -BYQ-).

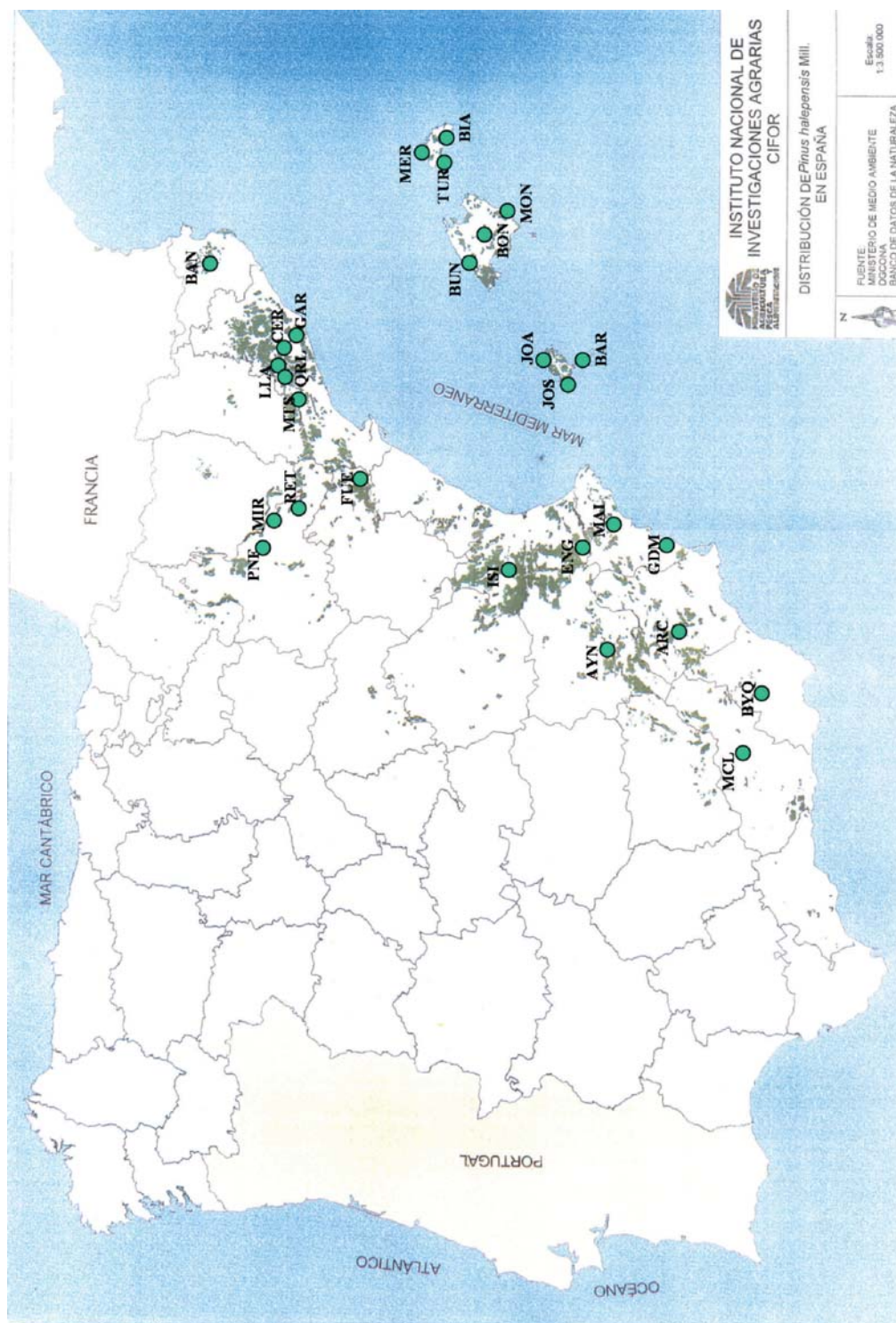


Figura 2. Red de cronologías de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y su área de distribución en la Península Ibérica e Islas Baleares. Los códigos asignados a cada localidad son los que se detallan en la Tabla 1.

Código	Topónimo	Municipio	Provincia	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Orientación	Pendiente (%)	Afloramientos rocosos (%)	Profundidad suelo
E0ARC	Sierra de Archivel	Archivel	Murcia	32,092	-2,033	1086	NW	52	0-5	media
E0AYN	Ayna Los Luisos	La Dehesa	Albacete	38,594	-2,079	1000	N	32	0	media
E0BAN	Banyoles	Porqueres	Girona	42,107	2,739	260	E-NE	31	0	media
E0BAR	Es Cap de Barbaria	Formentera	Baleares	38,657	1,077	80	No	0	10-15	elevada
E0BIA	Cala Biniancolla	Biniancolla	Baleares	39,816	4,261	50	S	5	10	---
E0BON	Santuari de Bonany	Vilafranca de Bonany	Baleares	39,582	3,076	200	W	9	0	elevada
E0BUN	Comuna de Bunyola	Bunyola	Baleares	39,808	2,705	500	S-SE	< 5	> 25	media
E0BYQ	Pinar de Bayarque	Bayarque	Almería	37,313	-2,465	1280	W	51	10-15	escasa
E0CER	Sta. Maria de Cervelló	Cervelló	Barcelona	41,397	1,958	300	SE	53	> 25	media
E0ENG	Serra d'Enguera	Navalón	València	38,857	-0,897	800	S	40	10	escasa
E0FUE	Fuentealpida	Fuentealpida	Teniel	40,825	0,083	850	S	36	> 25	escasa
E0GAR	P.N. del Garraf	Olesa de Bonesvalls	Barcelona	41,341	1,844	300	N	---	> 25	media
E0GDM	Guardamar del Segura	Guardamar del Segura	Alacant	38,092	-0,649	10	No	0	< 5	elevada
E0ISI	Los Isidros	Venta del Moro	València	39,450	-1,275	635	No	0	10	media
E0JOA	Cala Xarraca	St. Joan de Labritja	Baleares	39,099	1,511	175	N	55	5-10	media
E0JOS	Sa Talaita de St. Josep	St. Josep	Baleares	38,909	1,256	360	E	31	5-10	escasa
E0LLA	Serra d'Ancosa	La Ullacuna	Barcelona	41,450	1,533	730	E	30	0-5	media
E0MAI	Serra de Maigimó	Tibi	Alacant	38,525	-0,636	900	N	50	> 25	escasa
E0MCL	El Mescal	Pedro Martínez	Granada	37,514	-3,173	1150	N	35	> 25	media
E0MER	Monte Toro	Es Mercadal	Baleares	39,999	4,063	200	S	25	5-10	---
E0MIR	Miramón	Monegrillo	Zaragoza	41,615	-0,331	500	SE	10	0-5	elevada
E0MON	P.N. de Mondragó	Alqueria Blanca	Baleares	39,035	3,191	60	W	5		elevada
E0MTS	Serra de Montsant	Margalef	Tarragona	41,329	0,820	775	N-NW	32	< 5	escasa
E0PNF	Vedado de Peñafior	Peñafior de Gállego	Zaragoza	41,779	-0,709	350	N	42	5-10	media
E0QRL	Puig de les Marietes	Querol	Tarragona	41,387	1,433	770	NW	13	< 5	media
E0RET	La Retuerta de Pina	Pina de Ebro	Zaragoza	41,480	-0,242	386	N-S	15	20	escasa
E0TUR	Cala en Turqueta	Santa Galdana	Baleares	39,938	3,916	63	W	10	5	---

Tabla 1. Localización y características fisiográficas de las poblaciones de pino carrasco que componen la red de estudio.

La descripción general de las localidades incluyó la determinación de la geología, edafología y el tipo de formación vegetal de cada una de ellas (Tablas III-1 y III-2). Dicha información fue completada a partir de distintas fuentes documentales. La información geológica se extrajo principalmente del Mapa de Geología de España. Serie Magna (1:50.000); la edafología de cada localidad se consultó en el Sistema Español de Información de Suelos (SEIS.net) basado en la clasificación USDA; y para la determinación del tipo de vegetación se siguió la clasificación bioclimática de Rivas-Martínez publicada en 1987 en la Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España y de su correspondiente mapa (escala 1:400.000).

Trabajo de campo

Los criterios considerados para la selección de las localidades que componen la red de estudio (Figura 2) fueron:

- (i) que en el conjunto de la red de localidades se hallaran representados todos los fitoclimas en los que se pueden encontrar masas forestales de pino carrasco en España siguiendo la clasificación climática de Allué (1990).
- (ii) que se tratara de bosques maduros (y lo más viejos posible) siendo a su vez, y en la medida de lo posible, representativos de las masas forestales de la especie en cada región.
- (iii) y por último, también se procuró que las localidades de estudio estuvieran lo más homogéneamente repartidas a lo largo del área de distribución de la especie.

En cada localidad, se seleccionó una masa forestal homogénea lo más longeva posible, y que a su vez, fuera representativa de los bosques de la zona. En cada bosque se realizó una descripción general del tipo de vegetación, geología, edafología y estructura. Los datos referentes a las características forestales (densidad y área basal) se basaron en los datos de parcelas de 20·20 m² (Figura 3).



Figura 3. Fotografías de las parcelas delimitadas para determinar la densidad y área basal de la masa forestal. A la izquierda, MAI (Serra de Maigmó, València) y a la derecha, LLA (La Llacuna, Barcelona).

En cada bosque se seleccionaron entre 8 y 22 individuos, lo más viejos y sanos posibles para la extracción de las muestras de los anillos de crecimiento (testigos de madera). De cada árbol se extrajeron un mínimo de dos muestras y un máximo de cuatro en radios de distintas orientaciones para contrastar el crecimiento heterogéneo de los árboles (Gutiérrez 1985, Pilcher 1990). La extracción de las muestras se llevó a cabo mediante el uso de barrenas Pressler de 0,5 cm de diámetro interior, tal y como ilustra la figura 4.



Figura 4. Extracción de un testigo de madera mediante el empleo de una barrena Pressler.

La altura de extracción de las muestras fue aproximadamente 1,30 m (DAP). De cada árbol se midió la altura, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de extracción de las muestras, y el grosor de corteza y de albura de cada muestra. También se realizaron, cuando correspondía, observaciones generales del estado del árbol (presencia de heridas y/o podredumbres, anomalías en el crecimiento, grado de dominancia, etc.).

Trabajo de laboratorio

Datación y sincronización de los anillos de crecimiento

Los testigos de madera, una vez secados a temperatura ambiente durante varios días, se fijaron sobre una guías de madera diseñadas expresamente para dicha finalidad. Para visualizar correctamente los anillos, es necesario pulir las muestras con papel de lija para madera de grano sucesivamente más fino. La datación de cada anillo se realizó siguiendo el método propuesto por Yamaguchi (1990). La datación se inicia por el último anillo formado, bajo la corteza, el cual corresponde al año de muestreo o anterior (según si la fecha de muestreo es posterior al inicio del período de crecimiento o no, respectivamente). A partir de este anillo, se va contando hacia atrás en el tiempo, asignando a cada anillo el año de calendario en el que se formó. Simultáneamente, se comprueba la posición temporal de los anillos característicos para detectar anomalías en el crecimiento del árbol, como por ejemplo los anillos dobles (o falsos) y los anillos ausentes. Se consideraron anillos característicos, entre otros, los que destacan por ser muy estrechos o muy anchos, los de helada y los que presentaron cambios de densidad o coloración en la madera tardía. En la figura 5 se muestran algunos ejemplos.

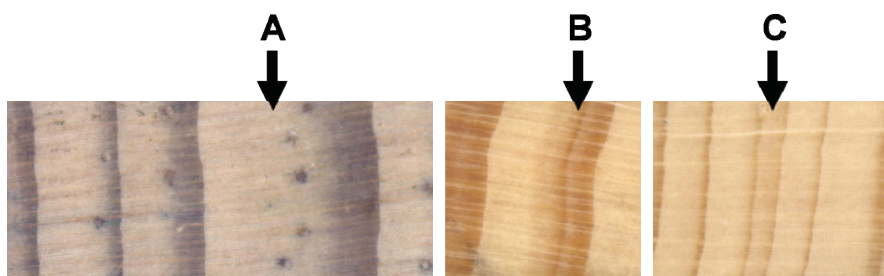


Figura 5. Tres tipos de anillos característicos que se encuentran con mayor frecuencia en el pino carrasco. **A**, anillo ancho; **B**, anillo con cambio de densidad; **C**, anillo estrecho.

Todo el proceso de datación, identificación de los anillos y sincronización de las muestras se realizó examinando los testigos de madera visualmente bajo una lupa binocular a 40 X. Finalmente, se midió el grosor de cada anillo mediante el uso de un aparato de medida semiautomático conectado a un ordenador, usando el programa CATRAS (Aniol, 1983). La precisión de las medidas fue de 0,01 mm.

Validación de la datación

Para confirmar y validar las dataciones y sincronizaciones visuales, las series del grosor de los anillos fueron comparados estadísticamente mediante el programa COFECHA (Holmes 1983, 1996). Para cada localidad de muestreo, la validación consistió en examinar la correlación de cada serie (conjunto de medidas del grosor de los anillos de un testigo de madera) con la serie promedio (en cuyo cálculo participaron el resto de series de la misma localidad), la cual se usó, provisionalmente, como serie de referencia. Las correlaciones se calcularon después de eliminar la tendencia debida a la edad, mediante el ajuste de funciones *spline* y el efecto de la dependencia del crecimiento de un año con el de años anteriores, mediante la extracción de modelos autoregresivos. Determinadas muestras presentaron segmentos con crecimientos anómalos o que presentaban correlaciones bajas (no significativas) con la serie de referencia. Estos casos se trataron por separado, y tal y como recomienda Blasing *et al.* (1984), en los casos en los que no se obtuvieron mejoras, se eliminaron dichos segmentos o muestras.

Cronologías del grosor de los anillos de crecimiento

Obtención de las cronologías

Las cronologías, series promedio del conjunto de muestras que representan el crecimiento radial a lo largo del tiempo, pueden formarse con las series de crecimiento bruto o con las series estandarizadas según los objetivos del estudio. En estudios de producción forestal suele trabajarse con datos brutos porque el objetivo

es conocer cuánta madera (en términos absolutos) han producido anualmente los árboles de una localidad. En cambio, los estudios dendroclimáticos requieren trabajar con series estandarizadas, ya que es preciso que las series de crecimiento individual de cada árbol sean comparables entre sí. En términos matemáticos significa que las series deben ser estacionarias, es decir, con una media y varianzas constantes.

Como modelo conceptual, y muy simplificado (pues no contempla la interacción entre factores distintos), se puede entender el crecimiento anual de un árbol como la combinación lineal de diferentes factores (Cook y Kairiukstis 1990). La expresión matemática de este modelo es:

$$A_t = E_t + C_t + dP_1 + dP_2 + U_t$$

A_t , es el grosor del anillo en el año t .

E_t , es el valor del grosor del anillo correspondiente a la tendencia del árbol debida a su edad (ésta, es una restricción física consecuencia de tener que añadir xilema a un radio creciente).

C_t , es el efecto de las condiciones climáticas del año t sobre el crecimiento.

P_1 y P_2 , son los efectos de diferentes tipos de perturbaciones sobre el crecimiento; P_1 representa las perturbaciones del bosque que no afectan de la misma manera a todos los árboles del bosque, como por ejemplo los cambios en el crecimiento causados por la muerte aislada de algunos individuos. Mientras que P_2 , representa las perturbaciones o cambios que afectan de forma general a todos los árboles, por ejemplo efecto de un incendio o un movimiento del terreno.

d , es el indicador binario de la presencia o ausencia de la perturbación.

U_t , es la variabilidad en el grosor de los anillos no explicada por el resto de factores considerados en el modelo.

Este modelo sencillo sirve para ilustrar que, según los objetivos de cada estudio, la estandarización debe realizarse de distinto modo para así resaltar los factores objeto de estudio.

Tradicionalmente, los estudios dendroclimáticos se han llevado a cabo trabajando con muestras de árboles que han crecido en bosques abiertos o de forma aislada, y no sujetos a perturbaciones, de manera que las series de su crecimiento tan sólo incluyen el efecto de añadir un anillo a un diámetro cada vez más grande (E_t). Los métodos de estandarización para este tipo de series están muy definidos puesto que la dendroclimatología es una disciplina bastante antigua y con una metodología muy establecida y contrastada en múltiples estudios (Fritts *et al.* 1969, Fritts 1971, Fritts 1976, Cook 1990, Schweingruber 1996). Dichos estudios han sido muy útiles para establecer qué factores ambientales (climáticos y del entorno de los árboles) afectan el crecimiento, para reconstruir el clima en el pasado y el estudio de su variabilidad, e incluso, para predecir el crecimiento de los árboles bajo las condiciones climáticas que los GCM prevén. No obstante, es posible que las relaciones crecimiento-clima sean distintas dentro de las masas forestales, ya sea por el efecto de protección que ejercen los árboles entre sí, o por las diferencias en las condiciones del entorno que acostumbra a producirse en los

bosques (por ej. el tipo de suelo, que acostumbra a ser más profundo). En este sentido, de cara a la gestión forestal, resulta más interesante conocer el efecto de las condiciones climáticas y su variabilidad sobre el crecimiento de las masas forestales, aunque sea tan sólo, porque ocupan mayor territorio. Además, no es habitual encontrar árboles aislados de determinadas especies, y puede ser igual o incluso más interesante, Extraer el componente climático de las series del grosor de los anillos de crecimiento de árboles de dentro de una masa forestal es más complejo debido a la existencia de otros factores que también condicionan el crecimiento de los árboles (por ej. la competencia entre árboles, por las perturbaciones y por los cambios en las tasas de crecimiento que la propia dinámica y historia del bosque determinan). Todos estos factores generan ruido en las series entorpeciendo su modelización, puesto que en muchas ocasiones tienen carácter esporádico. Las técnicas de estandarización empleadas tradicionalmente en dendroclimatología (regresiones lineales, curvas exponenciales modificadas, etc.), en la mayoría de estos casos, carecen de la suficiente flexibilidad para extraer la variabilidad no debida al clima de las series del interior de los bosques. Quizás las *cubic smoothing splines* sean las mejores candidatas para estudios dendroclimáticos porque son un tipo de funciones en las que se puede regular la flexibilidad (Reinsch 1967, Rice 1969, World 1974, Cook y Peters 1981, Cook y Kairiukstis 1990). Aún así, no siempre es fácil determinar qué flexibilidad debe tener la *spline* aplicada para conseguir extraer la mayor variabilidad de baja frecuencia no debida al clima y la menor variabilidad de alta frecuencia. Y esta tarea es especialmente delicada cuando se trabaja con series de árboles de dentro del bosque, ya que en ellas pueden haber cambios súbitos debidos a la propia dinámica forestal (por ejemplo, por la liberación de recursos por muerte de un vecino). Para ello, se contrastó como varía la señal climática que contienen las cronologías en función de la longitud de la *spline* ajustada en la red de localidades de pino carrasco (ver apartado correspondiente). La obtención de los índices de crecimiento se realizó mediante la división entre las series brutas de crecimiento y la función *spline* de 25 años de longitud; y mediante la extracción de los modelos autoregresivos de primer y segundo grado.

El programa informático utilizado para obtener las cronologías fue el ARSTAN (Holmes 1996). Las cronologías con las que se trabajó en este estudio fueron las residuales, puesto que el principal propósito del mismo es dendroclimático. Las series estandarizadas de las muestras de una misma localidad se han promediado mediante el método *biweight mean*, porque, al ponderar los valores extremos, es el más recomendado para extraer los efectos de la dinámica interna de las masas forestales y/o tendencias comunes en las series de anillos de crecimiento (Cook y Kairiukstis 1990, Holmes 1996).

Se optimizó el período de tiempo que abarcan las cronologías y el valor de sus parámetros estadísticos de control de calidad mediante la selección de los testigos de madera y de los períodos de tiempo que las componían. Para ello, se eliminaron las muestras o segmentos de las mismas que presentaban correlaciones no significativas con el resto de muestras del mismo lugar. Las correlaciones de cada muestra con el resto se calcularon por períodos de 40 años con un desplazamiento de 20 en correspondencia con la longitud media de las series (114 ± 34 años, i.e. un 35% de la longitud de las series). Los fragmentos y/o series

eliminadas presentaban correlaciones bajas aunque su datación era visualmente correcta. En este sentido, Wigley *et al.* (1984) establecen como valor de referencia para considerar una serie estadísticamente fiable un EPS de 0,85. De acuerdo con este valor, se determinó la longitud de todas las cronologías construidas.

Parámetros descriptivos

Los parámetros utilizados para determinar la calidad y las propiedades temporales de las cronologías obtenidas fueron: la desviación estándar (DS), la sensibilidad media (MS_x), el SNR (ratio señal-ruido), el EPS (*Expressed Population Signal*), y el porcentaje de variabilidad explicada por el primer componente de un análisis de componentes principales (VAR CP-I). También se consideró que se minimizara la autocorrelación de grado 1 y 2. Una explicación clara y concisa de los estadísticos EPS y SNR puede encontrarse en Oberhuber *et al.* (1998), mientras que una descripción más detallada, tanto de éstos índices como del MS_x , se encuentra en Briffa y Jones (1990).

El EPS es un estadístico que mide en qué grado el conjunto de muestras seleccionadas es representativo del crecimiento radial de la población. Alcanza valores entre 0 y 1, siendo más elevado cuantos más árboles forman la cronología y cuanto más elevadas son las correlaciones entre ellos. Una revisión detallada de este parámetro, su cálculo y sus aplicaciones puede encontrarse en Wigley *et al.* (1984).

Los coeficientes de autocorrelación de primer y segundo grado- $AR_{(1)}$ y $AR_{(2)}$, respectivamente- es decir, la correlación media de cada muestra consigo misma desplazándola uno o dos años, respectivamente, indican el grado de dependencia del crecimiento de un año respecto a los anteriores (Cook y Kariuskstis 1990). Así, el hecho que un año haya sido favorable para el crecimiento condiciona que, al año siguiente, éste también sea mayor debido a la acumulación de reservas en el tronco del árbol y/o por la mayor vigorosidad del árbol (Fritts 1976). Cuando se establecen cronologías con la finalidad de estudiar el efecto del clima sobre el crecimiento de los árboles y/o hacer reconstrucciones dendroclimáticas, conviene eliminar la autocorrelación en las series para obtener resultados más claros.

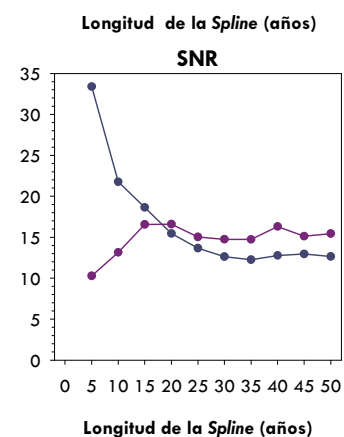
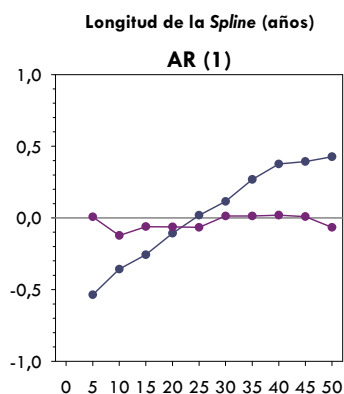
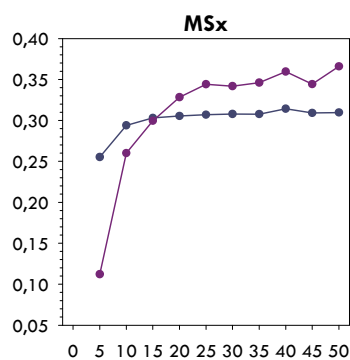
La sensibilidad es una medida de las diferencias interanuales en una serie temporal (Fritts 1976). La sensibilidad media (MS_x) es el promedio de los valores absolutos de las sensibilidades calculadas para cada par de años consecutivos. De esta manera, este índice expresa el porcentaje de cambio medio en el crecimiento entre pares de años atribuible a los factores del entorno (Cook y Kariuskstis 1990).

El VAR CP-I, es un parámetro estadístico que pone de manifiesto en qué grado las distintas muestras que forman una cronología presentan patrones temporales homogéneos. Dicha variabilidad en el crecimiento que comparten los árboles de una misma zona puede interpretarse como la respuesta común de los árboles al clima regional (Gutiérrez *et al.* 1998, Tardif *et al.* 2003, Macias *et al.* 2004).

El SNR (*Signal-Noise Ratio*) es una medida de la varianza en común en el crecimiento de los distintos árboles de una misma masa forestal ponderada por la varianza total (Wigley *et al.* 1984, Cook y Kariukstis 1990). Es decir, el SNR es una expresión de la fuerza que tiene la señal común en el crecimiento de los distintos árboles, el cuál tiene como causa el clima (Liang *et al.* 2001).

Determinación empírica de la longitud de la función *spline*

La longitud de la función *spline* ajustada a las series de crecimiento brutas debe de ser suficientemente flexible para eliminar los cambios en el crecimiento radial de los árboles debidos a la dinámica forestal y al régimen de perturbaciones. Pero a su vez, debe de ser suficientemente rígida para conservar la mayor parte de la variabilidad de media y alta frecuencia (que está relacionada con el clima) (Cook y Peters 1981).



Para optimizar la longitud de la *spline*, se evaluaron los efectos de ajustar longitudes diferentes sobre los parámetros descriptivos de calidad de las cronologías que, a su vez, describen: la sincronía en el crecimiento entre árboles (SNR y VAR-CP-I), la cual está relacionada con el clima, y su sensibilidad a las condiciones del entorno (MS_x).

Los resultados obtenidos indicaron que, en la mayoría de localidades, el SNR se mantenía elevado hasta longitudes inferiores a 15 años, y después se estabilizaba. Por otro lado, la evolución del componente autoregresivo indica que, en la mayoría de las cronologías, éste aumentaba considerablemente cuando se utilizaban longitudes superiores a los 20-25 años (ruido azul). Dicho en otras palabras, cuando se ajustaban *splines* demasiado flexibles, se cambiaba la estructura temporal de las series, de manera que éstas se autocorrelacionan negativamente. En resumen, los resultados obtenidos muestran que, para la mayoría de cronologías, los parámetros considerados se optimizaban ajustando una función *spline* de 25 años; en la figura 6 se ilustra un ejemplo.

Figura 6. Valores de sensibilidad media - MS_x -, del coeficiente de autocorrelación de primer grado - $AR(1)$ - y de la relación señal-ruido -SNR- de la cronología estándar (círculos azules) y de la residual (círculos granates) según la longitud de la función *spline* ajustada a las series brutas (grosor de los anillos de crecimiento) de la localidad de Banyoles (BAN, Girona).

Por otro lado, se contrastó el efecto de ajustar diferentes longitudes de la función *spline* para las distintas muestras según convenga en cada caso, o, por el contrario, usar la misma longitud para todas las muestras de la misma localidad. En primer lugar, se determinó la longitud de la *spline* que se debería ajustar a cada serie de crecimiento bruta. A continuación, se clasificaron las localidades según el valor promedio de la longitud de las *splines* ajustadas, y su desviación estándar (Tabla 2). De cada uno de los grupos establecidos según la longitud promedio de la *spline*, se escogieron las localidades extremas (con menor y con mayor DS), y para cada una de ellas, se han obtuvieron tres cronologías distintas: una, ajustando una longitud común a todas las muestras de 25 años; otra, ajustando una *spline* con la longitud promedio obtenida para dicha localidad; y una tercera, ajustando la *spline* individual de cada muestra de cada localidad.

	DS < 2.63	DS > 2.63
Promedio = 23	QRL	BAN GAR ARC
Promedio = 24	MAI JOS MER MTS JOA	TUR BYQ
Promedio = 25	LLA MCL FUE GDM MIR ISI BAR	BIA RET CER AYN ENG PNF

Tabla 2. Clasificación de las localidades con mayor variabilidad en la longitud de la función *spline* ajustada individualmente a cada muestra, según el valor promedio de las longitudes ajustadas a las distintas muestras de la cronología y su desviación estándar (DS). Para más detalles, ver texto.

Los resultados obtenidos mostraban que, cuando se aplicaba una *spline* de 25 años a todas las muestras de cada localidad, se optimizaban los parámetros estadísticos en la mayoría de las localidades. Tan sólo en las localidades con promedios distintos a 25 y con desviaciones estándares muy elevadas parecía que era mejor aplicar longitudes distintas para cada muestra o serie. No obstante, las diferencias en los parámetros aparecieron en el tercer decimal con lo que no resultaron ser significativas. De esta manera, la obtención de las cronologías para este estudio se realizó ajustando a todas las series funciones *spline* de 25 años de longitud, siendo la metodología de estandarización homogénea en todas las cronologías y favoreciendo así la posterior comparación de los resultados.

SEGUIMIENTO DEL CRECIMIENTO RADIAL EN EL GARRAF

Trabajo de campo

Localidad y zona de estudio

La localidad de estudio está situada en un valle interior del macizo cárstico del Garraf (sector suroeste de la Cordillera Costero-Catalana), a unos 40 Km de Barcelona, cerca del municipio de Begues ($01^{\circ}50'E$ y $41^{\circ}21'N$) a 300 m de altitud (Figura 7). La zona se quemó completamente en el año 1982, pero actualmente el recubrimiento vegetal en ambas laderas es muy elevado y similar (96% en la ladera norte -N-, y del 95% en la sur -S-). En cambio, difieren en el dominio de vegetación: en la ladera S, se encuentra el matorral con dominancia de *Quercus coccifera* (asociación *Quercetum-lentiscetum*); y en la ladera N, el encinar litoral (asociación *Quercetum ilicis galloprovinciale*) (Folch 1986).

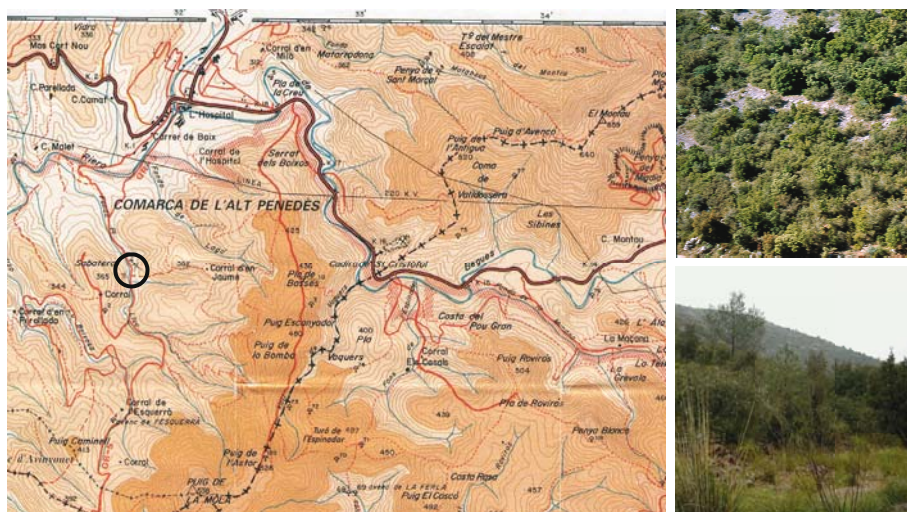


Figura 7. A la izquierda, situación geográfica de la zona de estudio en Garraf. Imagen extraída del mapa topográfico 1/25.000 (Ed. Alpina 1996). A la derecha, fotografías de la ladera N (arriba) y la S (abajo).

Los suelos de la zona son fersialíticos, descarbonatados y algo arcillosos, lo que les confiere cierta compactación (Abril, 1987). Además, la abundancia de afloramientos rocosos (sobretudo en la ladera S) crea discontinuidades en el suelo. El material originario está formado por calcáreas secundarias -margas y dolomías- del Mesozoico que presentan gran capacidad de infiltración de agua (Riba *et al.* 1979, Panareda 1986).

El clima de la zona es típicamente mediterráneo, caracterizado por una disminución notable de las lluvias cuando las temperaturas son más altas y una gran

variabilidad interanual. La temperatura media anual es de $13,16 \pm 5,78^{\circ} \text{C}$ y la precipitación total anual es, en promedio, de $672,61 \pm 174,09 \text{ mm}$, según los registros del observatorio meteorológico de Begues de los últimos 54 años (1951-2005). La zona presenta como peculiaridad una menor influencia marítima de la que le correspondería por su situación geográfica, debido a que la Cordillera litoral actúa de barrera fisiográfica. La gran variabilidad climática interanual se pone de relieve en la gran diversidad de condiciones registradas durante el período de estudio (desde abril de 1995 hasta julio del 2004; capítulo I).

Seguimiento del crecimiento radial

En abril de 1995, se seleccionaron 10 individuos de *P. halepensis* de la misma edad (22 años); 5 (del Ph-6 al Ph-10) situados en una ladera con exposición NNE (ladera N) y 5 (del Ph-1 al Ph-5), en una ladera con exposición SSW (ladera S). De esta manera, se ha podido contrastar el crecimiento del pino carrasco bajo regímenes de insolación distintos, y por lo tanto, temperaturas y demandas hídricas diferentes.

Se midió la altura, el diámetro y el volumen de la copa de cada árbol. El diámetro inicial medio de los individuos y su desviación estándar era, a la altura del dendrómetro, de $2,85 \pm 0,56 \text{ cm}$ (N) y $2,38 \pm 0,57 \text{ cm}$ (S). Para determinar los incrementos en el grosor del tronco, instalamos un dendrómetro de banda (*Manual band dendrometers*, <http://www.phytogram.com/manualband.htm>) en el tronco de cada árbol a 1,30 m de la base aproximadamente (Figura 8).



Figura 8. Dendrómetro de banda instalado en un pino carrasco en la localidad de estudio, Garraf.

Los dendrómetros de banda son unos instrumentos de tensión constante, capaces de registrar cambios en la circunferencia del tronco (con un error térmico de $0,11 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ} \text{C}$). El sistema operativo consiste en dos tubos concéntricos. El tubo exterior está fijado al tronco del árbol. Un extremo de la banda está sujeta al extremo de dicho tubo. La banda metálica está colocada alrededor del tronco y sujeta por el otro extremo al tubo interior. A medida que cambia el perímetro del tronco, el tubo interior se desplaza dentro del tubo exterior contrayendo o relajando un sistema de muelles, que son los responsables de mantener una tensión constante de la banda

alrededor del tronco. Los cambios en el perímetro de la circunferencia se cuantifican midiendo con un pie de rey los cambios en la posición relativa de los dos tubos. Los dendrómetros tienen la ventaja de proveer series temporales continuas del crecimiento del tronco con la frecuencia de medición que se desee (segundos, minutos, horas, días, meses, etc.), indicando cuando se produce la división celular del cámbium y el crecimiento de las células del xilema y del floema. Pero además de estos cambios irreversibles, los dendrómetros también detectan cambios reversibles, como son el encogimiento y la dilatación del tronco provocados por la hidratación y la pérdida de agua de las células (Kozlowski y Winget 1964, Irvine y Grace 1997, Offenthaler *et al.* 2001, Deslauriers *et al.* 2003). No obstante, los dendrómetros han sido utilizados en numerosos estudios para estudiar el patrón de crecimiento radial de los árboles (formación de los anillos de crecimiento) y su relación con el clima (Fritts 1958, Kozlowski y Winget 1964, Pietarinen *et al.* 1982, Downes *et al.* 1999, Nicault 1999, Worbes 1999).

Medimos el incremento en perímetro detectado por los dendrómetros entre 7 y 21 veces por año usando un pie de rey electrónico cuya resolución de medida era de 0,01 mm. En el año 2001, la frecuencia de muestreo fue exactamente cada 15 días para así detectar posibles efectos de la frecuencia de muestreo (por ej. el alisado de las series de crecimiento) mediante la comparación de este año con los demás.

Con la misma frecuencia en que se midieron los dendrómetros, también se realizaron observaciones y mediciones fenológicas de brotes, flores y frutos. El trabajo de campo terminó en julio del 2004, aunque el registro de los datos de los dendrómetros continua en la actualidad a cargo de los guardas forestales del Parc Natural del Garraf.

Cálculo de las tasas diarias de crecimiento en perímetro

Se calcularon las tasas de crecimiento en perímetro de cada árbol (mm/día) como el cociente entre el incremento en perímetro del tronco y el número de días transcurridos entre cada par de días de muestreo.

La comparación entre las series de las tasas de crecimiento de cada árbol se llevaron a cabo a través de distintos métodos, ya que cada uno de ellos responde a distintas cuestiones planteadas. Una primera comparación se realizó mediante un análisis de correlaciones de *Spearman*, r_s , un coeficiente que no impone la presunción que exista una relación lineal entre las variables comparadas y que es menos sensible a la presencia de valores extremos (Sokal y Rohlf 1987). De esta manera, se contrastó la sincronización en el crecimiento entre los distintos individuos. Con el fin de detectar tendencias en esta sincronía, se ajustó una regresión lineal a los valores anuales de correlación medios. Los años 1995 y 2004 no fueron considerados en el ajuste por ser años con registro incompleto. Además, en 1995 podría haber una infraestima del crecimiento total anual debido a los efectos de la instalación de los dendrómetros (Bormann y Kozlowski 1962, Keeland y Sharitz 1993).

Una segunda comparación se realizó mediante el análisis de componentes principales (ACP), con el fin de poner de manifiesto no sólo la homogeneidad en el patrón de crecimiento de los pinos, sino también la presencia de grupos de árboles con un crecimiento más afín debido a las condiciones microambientales. Este análisis resulta a su vez, muy útil para determinar el porcentaje de variabilidad común en el crecimiento de los distintos árboles que puede atribuirse a factores generales (que afectan igualmente a todos los árboles), como por ejemplo el clima (Gutiérrez *et al.* 1998, Tardif *et al.* 2003). En este caso, el ACP se ha basado en la matriz de covarianzas en lugar de la matriz de correlaciones. De esta manera, se evitan los efectos que podría tener en la ordenación de los árboles, el hecho que unos crezcan más que otros (ter Braak 1994). Una explicación más detallada del ACP se encuentra dentro del apartado de los análisis multivariantes.

Una vez comprobada la homogeneidad en las series de las tasas de crecimiento radial de cada árbol, se calculó el promedio y la desviación estándar para cada ladera (N y S). También se calculó el diámetro acumulado de cada árbol, el cual fue posteriormente estandarizado dividiendo cada valor por el diámetro inicial del árbol.

Relaciones crecimiento-clima con las tasas diarias de crecimiento en perímetro

Para establecer estas relaciones crecimiento-clima, se calcularon funciones respuesta móviles mediante el análisis de regresión múltiple después de extraer los componentes principales de los predictores (ver el apartado sobre las funciones respuesta). De esta manera, se eliminó la colinearidad entre variables. Las variables consideradas fueron temperatura media (TM), precipitación total (PR), número de horas de luz diarias, radiación solar (RS), índice bioclimático de disponibilidad hídrica PR/ET_o (donde ET_o es la evapotranspiración potencial) e índice de aridez $PR/2 \cdot TM$. Este último, ha sido descrito por Fidalgo (1988) como un índice muy útil para analizar los efectos del clima mediterráneo sobre el desarrollo de la vegetación. Primero, todas las tasas de crecimiento en perímetro se ordenaron atendiendo a su día juliano anual. Después, las funciones respuesta móviles se calcularon usando grupos de 30 datos con uno de desplazamiento. La longitud del intervalo de análisis fue escogida con la finalidad de garantizar la robustez estadística necesaria del análisis, y todos los cálculos fueron realizados con el paquete 3PBASE (Guiot y Goeury 1996).

SERIES CLIMÁTICAS Y CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA

Para la realización de un estudio climático comparativo de este tipo es necesario, en primer lugar, conocer las características generales del clima de cada localidad, sus peculiaridades y su evolución a lo largo del tiempo. Por este motivo, es necesario obtener el mayor número de variables climáticas y series de datos lo más largas posible. En general, en la Península Ibérica, los registros de datos meteorológicos son muy fragmentados e incompletos, sobretudo en las zonas

montañosas, puesto que las estaciones más antiguas y completas se encuentran en los puertos, aeropuertos y capitales de provincia. En la mayoría de los casos, dichas series climáticas no son representativas de los bosques estudiados debido a la diferencia en altitud, a la producción de calor de las masas urbanas y/o a la distancia geográfica entre el bosque de estudio y la ciudad donde se halla el observatorio meteorológico. Este es el motivo por el cual, en algunas localidades, no se pudo trabajar con los datos de una sola estación meteorológica cercana y representativa del bosque de estudio. En estos casos, se utilizaron (para alguna de las variables climáticas) datos de una estación más lejana para estimar los de la estación más próxima. Previamente a la estimación de los datos, se comprobó que ambos observatorios pertenecieran al mismo tipo de fitoclima según Allué (1990) y que hubiera una relación significativa en las condiciones climáticas existentes entre ambas estaciones. La comparación entre pares de estaciones meteorológicas se realizó para cada variable mensual mediante el ajuste de funciones lineales siguiendo la metodología propuesta por la FAO (1998); posteriormente los resultados obtenidos en dichas regresiones fueron utilizados para estimar los datos ausentes. Las variables climáticas consideradas en este estudio fueron: precipitaciones (PR), temperatura media (TM), temperatura media de las máximas (TMA), media de las mínimas (TMI), media de las máximas absolutas (TMAA) y media de las mínimas absolutas (TMIA); todas ellas mensuales. Las características de cada una de las estaciones meteorológicas usadas y los ajustes lineales (regresiones) realizados con sus descriptivos estadísticos se muestran en el anexo.

Selección de las estaciones meteorológicas

Los criterios tenidos en cuenta para la selección y composición de las series de clima, en orden de prioridad, han sido:

- Su proximidad, tanto geográfica como altitudinal, a los bosques de estudio.
- Que los observatorios constituyentes de una serie climática tuvieran características similares y que (en la medida de lo posible) participaran en la serie compuesta con, al menos, un intervalo temporal de 15 años. Este requisito se impone para detectar posibles inhomogeneidades.
- Que el intervalo temporal resultante fuese prolongado y permitiera una perspectiva histórica lo más amplia posible.

Con el conjunto de series seleccionado se obtuvieron la caracterización espacial del clima en la región estudiada. No obstante, para un estudio con finalidades estrictamente de carácter climático, sería deseable una mayor resolución espacial. Realizar un estudio más detallado pasaría por la consideración de un intervalo temporal de análisis más reducido debido a la ya mencionada fragmentación de los datos climáticos a escala local.

Obtención y verificación de los datos

Los datos mensuales de series pluviométricas y de temperaturas (TM, TM, TMI, TMAA y TMIA) de los observatorios seleccionados han sido proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM).

Algunas de las series construidas resultan de la composición de datos de distintos observatorios, ubicados en la misma localidad o en lugares relativamente próximos, seleccionando aquellas que tuvieran características lo más semejantes posible. Durante el proceso de construcción de las series se hizo un análisis descriptivo, por meses, estaciones y años, de las series utilizadas en cada caso y se exploró su homogeneidad (con el programa HOM; Holmes 1996), dedicando especial interés a los fragmentos con solapamiento entre observatorios. Una vez construidas las series, se efectuó un proceso iterativo de detección de datos anómalos y, finalmente, se procedió a la estimación de datos ausentes.

Revisión y validación de las series climáticas

La detección de datos erróneos, se llevó a cabo mediante la comparación gráfica de las distintas series de datos de cada observatorio (distintas variables), y con las series de otros observatorios cercanos al primero. De esta manera, también se comprobó que las series de datos de las estaciones seleccionadas siguieran la misma evolución temporal que el resto de estaciones cercanas. Con esta tarea, se detectaron posibles datos erróneos que fueron eliminados de las series, puesto que los datos erróneos extremos pueden resultar particularmente influyentes en el cálculo de las correlaciones y, en el consiguiente proceso de estimación de datos ausentes; además, distorsionan los resultados. Los datos considerados anómalos fueron sustituidos por valores interpolados; de la misma manera se han estimado los valores ausentes.

La longitud de las series de datos climáticos con las que se basa el presente estudio varían según la localidad. En la tabla 3 se presenta la longitud de las series climáticas obtenidas como representativas del clima local en cada población de pino carrasco estudiada.

Las series de precipitación se extienden en general hasta la década de los años 40, cubriendo los últimos 60 años, excepto en CER, MTS y BYQ que terminan en los años 50. No obstante, en algunas localidades (BIA y ARC), se llega hasta principios de la década del 1930, y en BAN, la serie pluviométrica cubre prácticamente todo el s. XX. En general, las series térmicas son más largas, comprendiendo toda la segunda mitad del s. XX. Además, para algunas localidades (BAN, MER, TUR, BIA, BUN, BON, MON, JOA, JOS y BAR) se han obtenido series de una longitud que oscila alrededor de los 100 años. Los períodos que abarcan las series de temperaturas máximas y mínimas son más cortos en algunas localidades, cubriendo solamente los últimos 25 años (FUE, MER, TUR, BIA, BAR, MCL y MON).

Localidad	Provincia	Período Precipitaciones	Período Temperaturas medias	Período Temperaturas absolutas
ARC	Murcia	1933-2002	1933-2000	1933-2000
AYN	Albacete	1943-1998	1943-1998	1943-1998
BAN	Girona	1912-2000	1912-2000	1912-2000
BAR	Baleares	1952-2001	1953-2001	---
BIA	Baleares	1933-2001	1888-2001	1988-2001
BON	Baleares	1945-2003	1869-2003	1869-2003
BUN	Baleares	1943-2003	1869-2003	1869-2003
BYQ	Almería	1955-1998	1953-2000	1953-2000
CER	Barcelona	1952-2002	1951-2002	1951-2002
ENG	València	1950-2001	1941-2001	1941-2001
FUE	Teruel	1945-2000	1951-2000	1987-2000
GAR	Barcelona	1942-2002	1951-2002	1951-2002
GDM	Alacant	1940-2000	1940-2000	1940-2000
ISI	València	1943-2000	1958-2000	1958-2000
JOA	Baleares	1945-2001	1953-2001	1953-2001
JOS	Baleares	1944-2001	1953-2001	1953-2001
LLA	Barcelona	1916-2000	1956-2000	1956-2000
MAI	Alacant	1948-2001	1950-2001	1950-2001
MCL	Granada	1942-2000	1971-2000	1986-2000
MER	Baleares	1942-2002	1888-2001	1984-1996
MIR	Zaragoza	1943-2000	1955-2000	1955-2000
MON	Baleares	1950-2003	1977-2003	1977-2003
MTS	Tarragona	1957-1998	1957-1998	1957-1998
PNF	Zaragoza	1962-2000	1964-2000	1964-2000
QRL	Tarragona	1929-2000	1956-2000	1956-2000
RET	Zaragoza	1941-2005	1947-2000	1947-2000
TUR	Baleares	1949-2001	1888-2001	1984-1996

Tabla 3. Longitud temporal de las series de datos meteorológicos obtenidos para cada localidad de la red de *P. halepensis*. Los detalles de las estaciones meteorológicas empleadas y del proceso de obtención, verificación, revisión y validación de los datos se detallan en la metodología y en el anexo.

Las series climáticas regionales seleccionadas se correspondieron con las series de los observatorios de las capitales de provincia más cercanos a las localidades que constituyen cada uno de los grupos, previamente establecidos. Los grupos de cronologías a escala regional, se delimitaron previamente mediante un análisis de cluster (AC), el cual se basó en los coeficientes de regresión parciales de las funciones respuesta (FR) realizadas usaron como predictores del crecimiento las series de clima local. En resumen, se emplearon los datos de los registros meteorológicos de Barcelona, Zaragoza, Albacete, Murcia, Granada, Almería y Palma de Mallorca. Todos ellos, fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM).

Los índices de teleconexiones empleados en este trabajo proceden de la *Climatic Research Unit (CRU)*, *University of East Anglia*. El índice NAO empleado se basa en la diferencia de presiones normalizadas entre Ponta Delgada, en el

archipiélago portugués de Azores y Reykiavik, en Islandia (Jones *et al.* 1997). El índice SOi se ha medido como la diferencia entre las presiones estandarizadas de Tahití y Darwin, y su cálculo se ha basado en el método propuesto por Ropelewski y Jones (1987). Se han utilizado dos variaciones del MOi. Una primera, definida por Palutikof *et al.* (1996) y Conte *et al.* (1989) que se basa en la diferencia entre las presiones normalizadas de L'Alguer y el Cairo (MOAC), y una segunda (MOIG) en la que se calcula la diferencia de presiones normalizadas entre Israel y Gibraltar (Palutikof 2003). Las series de datos de presión en que se basan dichos índices proceden de la interpolación de 16 puntos realizado por NCEP/NCAR. Para más detalles, consultar el enlace del CRU (<http://www.cru.uea.ac.uk/>).

Para la comparación entre las tasas diarias de crecimiento en perímetro obtenidas del seguimiento de los dendrómetros en el Garraf con las condiciones climáticas, se utilizaron los datos climáticos diarios de la estación Garraf-Begues que pertenece a la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya (XAC), por ser la más cercana geográfica y altitudinalmente (41° 19' 48"N, 1° 55' 48"E, 360 m snm.). Se trabajó con datos diarios para poder obtener los valores medios de cada variable entre cada par de días de muestreo, con el fin que las variables climáticas y las del crecimiento radial tuvieran la misma resolución. El período seco de cada año se caracterizó atendiendo a la duración y severidad de la sequía. La duración de la sequía se calculó contabilizando el número de días en los que PR fue inferior al doble de TM, de acuerdo con el criterio de Gaussen (Bagnouls y Gaussen 1953). También se contabilizó el máximo número de días secos consecutivos. La severidad de la sequía se cuantificó dividiendo el área (A) por el perímetro (PE) del período seco determinado en el diagrama climático de Gaussen. Los cálculos de PE y A se han realizado mediante el uso del analizador de imágenes Image J 1.34s (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Climodiagramas e índices fitoclimáticos

Una visión general, completa y sintética del clima la dan los diagramas ombrotérmicos o climodiagramas. Los diagramas ombrotérmicos son figuras que sintetizan las pautas generales del clima de una localidad, resaltando cuál es el intervalo de tiempo en el cual el agua puede resultar un factor limitante. En este tipo de figuras, basadas en la evolución a lo largo del año de las PR y TM mensuales, se puede distinguir el período seco. Según Gaussen, el período seco es aquel en el que la actividad vegetal se ve reducida o incluso puede llegar a detenerse dependiendo de la especie; y éste, se corresponde con el área delimitada por el cruce entre la curva de PR y TM, cuando la relación de las escalas de sus ejes es PR:2TM. Por otro lado, también describen la probabilidad mensual que se produzcan heladas (cuadro inferior) y dan una serie de indicaciones sobre las condiciones climáticas acontecidas en el lugar de estudio en el período de tiempo considerado (las temperaturas máximas y mínimas absolutas, la oscilación térmica anual, la media de las temperaturas máximas del mes más cálido y la de las mínimas del mes más frío). Una explicación más detallada de los climodiagramas puede encontrarse en Allué (1990).

La fitoclimatología resulta una herramienta muy útil para sintetizar las condiciones climáticas en relación con la vegetación poniendo especial interés en algún aspecto concreto del clima, como por ejemplo su aridez. Esta disciplina se ocupa de precisar cuáles son los conjuntos de parámetros climáticos que mejor se relacionan con las variables fitológicas. Dichas expresiones sinópticas obtenidas a partir de un número limitado de datos y variables reciben el nombre de índices fitoclimáticos. La combinación de diversos valores de variables o datos meteorológicos han dado lugar a la elaboración de índices que, posteriormente, han servido para definir regiones climáticas y para establecer relaciones entre el clima y el desarrollo vegetativo (Fernández 1995). Una extensa revisión de los distintos índices fitoclimáticos utilizados y sus formas de cálculo puede encontrarse en Fidalgo (1988). Con el fin de caracterizar el grado de aridez de las distintas localidades, se utilizaron los siguientes índices fitoclimáticos: el termopluviométrico, el de Phillipis, el de Giacobbe, el de Baudiere y el de Martonne. También se han determinado los índices de continentalidad de Gorezynski y Vernet, y el cociente de Emberger. Éste último, expresa la relación entre la precipitación total anual (PR) como expresión de la aridez, y la amplitud térmica anual como expresión de la continentalidad.

La expresión sintética del cociente de Emberger viene descrita por la fórmula:

$$H = 100 \cdot \frac{PR}{TMA_{(c)}^2 - TMI_{(f)}^2}$$

donde PR es la precipitación total anual, $TMA_{(c)}$ es la temperatura media de las máximas del mes más cálido, y $TMI_{(f)}$ es la temperatura media de las mínimas del mes más frío.

Análisis de los años característicos

Se considera año característico aquel que destaca por ser extremo en la variable de estudio (grosor del anillo de crecimiento, variables climáticas, densidad de la madera, etc.). Estadísticamente, se considera que en una variable con distribución de frecuencias normal, todos los valores que quedan fuera del rango ($\mu - 1.645 \cdot DS$, $\mu + 1.645 \cdot DS$) pueden considerarse extremos con una probabilidad del 90%. La normalidad de las series climáticas (PR y TM anuales) se contrastó mediante la prueba de *Shapiro-Wilks* y, cuando no se cumplía esta restricción, las series de datos fueron transformadas según recomiendan Sokal y Rohlf (1987). De esta manera, se detectaron los años, en los que los valores de precipitación total y temperatura media anuales fueron extremos con un nivel de confianza del 90% de nivel de confianza. Los resultados se presentan en forma del porcentaje anual de localidades que exhiben valores más elevados o más bajos que lo normal. Dichos porcentajes se han calculado para el conjunto de localidades ($n=27$) y para los mismos grupos que definió el análisis de cluster (AC) basado en dichas series climáticas. Es decir, para todas las localidades ubicadas en las Islas Baleares (MER, TUR, BIA, BUN, BON, MON, JOA, JOS y BAR), las situadas en el NE peninsular

(BAN, GAR, CER, LLA, FUE, MTS y ENG) y el resto, las situadas en el interior peninsular (PNF, MIR, RET, QRL, ISI, MAI, AYN, ARC, MCL y BYQ).

Esta misma metodología se aplicó a los índices de crecimiento (cronologías residuales) con el propósito de detectar los años en los que el crecimiento del pino carrasco fue extremadamente elevado o bajo. En dendroecología se considera que un año es característico si al menos la mitad de los árboles de una misma localidad (o el 25% de las muestras analizadas en una región geográfica amplia) presentan, el anillo de crecimiento del año en cuestión, muy estrecho o muy ancho. Las causas de estos crecimientos anómalos deben buscarse en las condiciones climáticas, puesto que al trabajar con los datos estandarizados, previamente, han sido eliminadas las tendencias o cambios en el crecimiento de los árboles debidos a su edad, a la dinámica forestal y/o a la historia del bosque (Cook y Kariukstis 1990).

Análisis espaciotemporal de las tendencias climáticas

Por definición, una tendencia es un cambio a largo plazo en el nivel medio de una serie; es decir, una desviación sostenida del valor promedio de una variable durante un período de tiempo determinado. El ajuste de rectas de regresión lineales ($Y = a + b \cdot X$) para caracterizar las posibles tendencias en las series climáticas ha sido un método ampliamente usado para mostrar, si en términos generales, se ha producido algún cambio sostenido en las condiciones climáticas en los últimos décadas. El parámetro que indica la tasa de cambio de la variable analizada es la pendiente de la recta ajustada (b), con lo que sus unidades son $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$, cuando se analizan series de precipitación y, $^{\circ} \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ en el caso de trabajar con series de temperatura.

El objetivo del presente apartado es contrastar si se han producido cambios en el nivel medio de las precipitaciones y de las temperaturas a lo largo del último siglo en cada localidad, y determinar cuándo han tenido lugar dichos cambios. Por este motivo y, para evitar que, al incorporar subperíodos de distinto comportamiento, las tendencias ajustadas enmascaren las variaciones temporales existentes, no se fijaron a priori los intervalos de tiempo a analizar. Para determinarlos, en primer lugar, se establecieron regresiones lineales en las series de PR y TM de cada localidad por períodos de 30 años con desplazamiento de un año. Se escogieron períodos de esta duración por ser la longitud mínima recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la caracterización de series climáticas. En segundo lugar, la representación de la pendiente de las rectas ajustadas permitió detectar en qué años se ha producido un cambio en la tendencia significativa de las series climáticas. Dicho de otro modo, los puntos de inflexión en la pendiente de las rectas ajustadas (y significativas al 90%) han sido los considerados para delimitar los períodos, en los que basar el análisis de tendencias. Un ejemplo se presenta en la figura 9. Finalmente, se obtuvo el porcentaje anual de localidades que presentan cambios de tendencias significativas. Se consideraron como años en los que existe un cambio de tendencia,

aquellos en los que al menos un 25% de las localidades presentaban un punto de inflexión en la pendiente del ajuste lineal significativo en las series de PR y/o TM. De esta manera, se determinaron cuatro intervalos de tiempo en los que basar el análisis espacio-temporal de las tendencias en el clima: 1900-1930, 1931-1950, 1951-1970 y 1971-1999.

Este análisis también se realizó con las series estacionales, para poder comprobar la contribución relativa con la que cada estación del año ha colaborado en la tendencia anual.

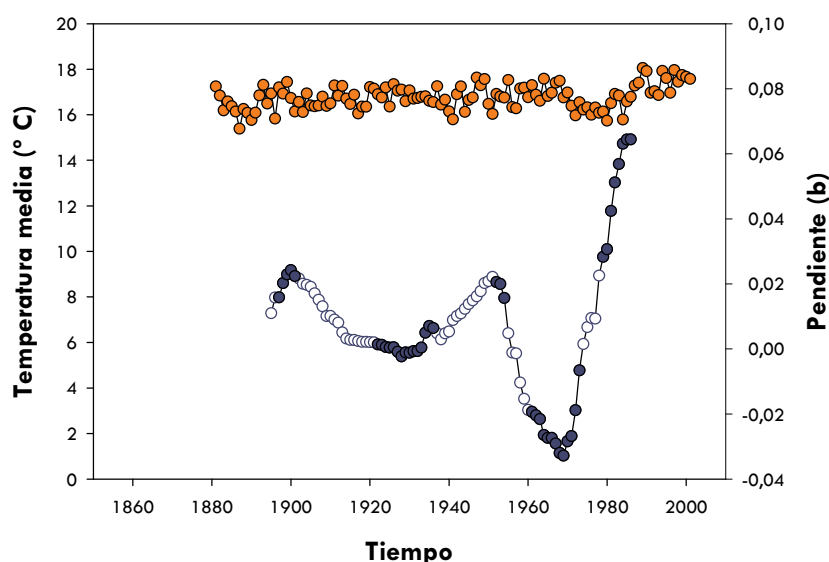


Figura 9. Representación de la evolución de la pendiente (círculos vacíos) de las rectas de regresión lineales ajustadas a la serie de temperatura media (círculos naranjas) representativa del clima en Cala Biniancolla (BIA, Menorca). Los ajustes se han realizado por intervalos de 30 años, y con un año de desplazamiento. En azul, las pendientes en las que el ajuste es significativo con el 90% de nivel de confianza.

Análisis espaciotemporal de la variabilidad climática

La variabilidad, entendida como la alternancia, incluso sucesión de años, en los que su valor difiere de forma significativa de los que preceden o suceden, puede expresarse de distintas formas, ya sea por medio del valor que toma un determinado estadístico o aplicando algún filtro o suavizado que facilite su observación y análisis. En el primer caso, se trata de estadísticos que recogen la variabilidad del conjunto de la serie, sin diferenciar aquellos momentos en que las

diferencias relativas pudieron ser de mayor o menor intensidad. Por medio del coeficiente de variación móvil (CV), es posible conocer la variabilidad de forma secuencial, al calcularse para un determinado intervalo de tiempo que se desplaza sobre el conjunto de la serie. De manera que, el CV permite destacar aquellas secuencias de años caracterizados por una mayor o menor variabilidad con gran precisión temporal (Almarza et al. 1996). De esta manera, se utilizó el CV de las series anuales y estacionales de PR, TM, TMA y TMI, para los mismos períodos que el análisis de tendencias climáticas (1900-1930, 1931-1950, 1951-1970 y 1971-1999). La elección de este coeficiente para la expresión de variabilidad responde a su condición de medida estándar y, por tanto, es comparable entre distintas localidades. En cada período y para cada localidad, se comparó el valor del CV con el valor promedio de todo el registro de datos instrumentales.

RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA RECIENTE Y DEL RÉGIMEN DE PERTURBACIONES DE LAS MASAS FORESTALES (ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LAS TASAS ANUALES DE CRECIMIENTO)

El estudio de la historia reciente de cada una de las poblaciones estudiadas se basó en el análisis de las series medias de crecimiento anual bruto y su desviación estándar. Se infirió en qué fase de la sucesión se encontraba cada bosque a partir de la existencia de períodos de tiempo con mayor/menor crecimiento y con mayor/menor varianza en las tasas de crecimiento anuales. Una descripción detallada de dicha metodología puede encontrarse en Bosch y Gutiérrez (1999). La limitación de este tipo de análisis radica en el hecho que estas series de crecimiento bruto presentan oscilaciones debidas a la edad y tamaño de los árboles, al clima, y/o a la dinámica y estructura del bosque; y algunas veces no es posible distinguir con suficiente claridad la causa de dichas oscilaciones. Por este motivo, y para dar mayor robustez a la reconstrucción de la historia reciente de los bosques, también se realizó un análisis para detectar los cambios súbitos en el crecimiento radial de cada árbol utilizando el programa estadístico TRU.

El análisis de los cambios súbitos en las tasas anuales de crecimiento realizado, consistió en el cálculo del porcentaje de incremento en las tasas de crecimiento entre cada pareja de años consecutivos, de acuerdo con Nowacki y Abrams (1997). Previamente se filtraron las series con una función *spline* de 25 años para así, poder destacar los cambios súbitos relacionados con el clima. El umbral definido para considerar un cambio súbito en el crecimiento radial entre pares de años como tal, fue que éste fuera igual o superior al 20% del crecimiento. Finalmente, los resultados se presentan en forma de porcentaje anual de árboles que presentan cambios en el crecimiento radial en cada localidad. La interpretación de los resultados obtenidos se basa en el hecho que todos los árboles de una misma localidad están afectados por el mismo conjunto de variables climáticas, de manera que la información común a todos ellos (como por ej. los aumentos en el crecimiento radial sincrónicos) puede considerarse de tipo climático (Cook y Briffa 1990).

ANÁLISIS MULTIVARIANTES: ACP, RDA Y AC

Todos los análisis multivariantes se realizaron utilizando el paquete estadístico SPSS 11.5. En concreto, para la elaboración del presente estudio, se realizaron tres tipos distintos de análisis multivariantes: análisis de componentes principales (ACP), análisis de redundancias (RDA) y análisis de cluster (AC). Las variables consideradas en cada uno de los ACP, RDA o AC realizados, se describen en el apartado y figura en los que se presentan los resultados para facilitar al lector la interpretación de los mismos. El período analizado fue, para el análisis de las cronologías, de 1949 a 1999, puesto que es el período común a todas las series de los anillos de crecimiento a todas las localidades; y para el análisis de las series climáticas, los últimos 30 años, por ser el período común y coincidir con el intervalo en el que el cambio climático se ha manifestado de forma más acusada (IPCC 2001).

El ACP es un análisis que permite representar, en un espacio de dimensiones reducidas, la variabilidad presente en una matriz de datos. El resultado es un diagrama de ordenación indirecta, en el que los árboles con un patrones temporales en las tasas de crecimiento más similares, quedan representados más cercanos. De esta manera, se puede visualizar de forma gráfica y sintética la similitud o diferencia entre todos los casos considerados, y distinguir cuáles son los principales ejes de variabilidad, es decir, los que representan mejor las diferencias entre localidades (ter Braak 1994). Así, por ejemplo, cuanto más parecidos sean los valores que dos localidades tengan para los distintos índices y variables climáticas seleccionados, más próximas quedaran representadas por dos puntos en el diagrama de ordenación (espacio definido por los ejes que explican mayor variabilidad o componentes principales -CP). En este tipo de análisis (ACP), cada eje o componente explica un porcentaje de la varianza total de las series, el cual es mayor en el primer eje (CP-I) y va decreciendo sucesivamente en el segundo, tercero, etc. (ter Braak y Prentice 1988).

Si bien el ACP es un análisis de ordenación indirecto, el RDA es un análisis directo, que permite representar las principales tendencias de la variabilidad presente en un conjunto de datos en un espacio reducido. Este espacio es, normalmente, de dos dimensiones linealmente independientes las cuales son, a su vez, combinaciones lineales de las variables ambientales proporcionadas (Legendre y Legendre, 1998). La significación ($p = 0,10$) de las variables ambientales se determinó mediante el test de Montecarlo, es decir, comparando su distribución de frecuencias con la construida con las 999 permutaciones. Además, la selección se ha realizado de forma escalonada (en cada paso sólo se añade aquella variable que, teniendo efecto significativo, explica mayor varianza en la matriz de datos a ordenar) para evitar introducir variables que aportaran información redundante.

El AC es un método estadístico multivariante de clasificación de datos en base a sus similitudes o diferencias (Tongeren 1987). A partir de la matriz de datos original (valores de las variables e índices climáticos de cada localidad) se origina una matriz de similitudes a partir del cálculo de las distancias entre los objetos estadísticos (localidades o cronologías). Posteriormente, mediante un método de aglomeración, y en base a las distancias entre los objetos, éstos se asignan a

grupos (o clusters) lo más homogéneos posible y, a su vez, tan distintos como sea posible en función de los propios datos. De esta manera, las localidades/cronologías con un clima más parecido serán asignados al mismo cluster, mientras que localidades/cronologías con climas distintos se colocaran en grupos distintos. Fritts (1974), fue el primero en utilizar esta metodología para extraer los principales rasgos de la respuesta al clima de un conjunto de cronologías del grosor de los anillos de crecimiento. El objetivo principal era delimitar conjuntos de cronologías que tuvieran una respuesta similar a los factores ambientales más determinantes del crecimiento.

En este estudio, la matriz de distancias se computó mediante el cálculo del coseno de los vectores entre dos localidades, y el algoritmo de clasificación utilizado fue el de la vinculación intragrupos, por ser el que mejor contribuía a la definición de los grupos.

FUNCIONES RESPUESTA: RELACIONES CRECIMIENTO-CLIMA EN LA RED DE LOCALIDADES BASADAS EN EL GROSOR DE LOS ANILLOS

Desde los inicios de la dendroclimatología, se han desarrollado distintas técnicas estadísticas para estimar la respuesta de los árboles a las condiciones climáticas (Fritts 1971, 1976, 1988). De forma genérica, el proceso de obtención de las relaciones crecimiento-clima consta de dos pasos: la obtención del modelo matemático (función respuesta, FR) que relaciona el crecimiento de los árboles con las variables climáticas (calibración); y la comprobación que el modelo obtenido es estadísticamente significativo (verificación).

Los primeros métodos usados para la obtención de estos modelos se basaban en simples regresiones múltiples (Fritts 1976). A pesar de la escasa precisión de los resultados (debido a que las variables climáticas están intercorrelacionadas entre ellas), éstos eran indicadores de tendencias generales. La introducción del análisis de regresión una vez extraídas los componentes principales de las series de datos climáticos, ha contribuido notablemente a la mejora de las estimaciones de las FR (Serre-Bachet y Tessier 1990). El análisis de componentes principales proporciona nuevas variables independientes entre sí, que son las que posteriormente se utilizan en la regresión múltiple (Cook y Kairiukstis 1990). El resultado, es un modelo en el que la variable dependiente es el crecimiento radial, y las independientes son las variables climáticas, cada una de las cuales tiene asociado un coeficiente de regresión parcial (r). Los coeficientes positivos indican una relación positiva entre el descriptor forestal (crecimiento) y la variable climática mensual considerada; es decir, que cuando más alto sea el valor de la variable climática más crecerán los árboles. De la misma manera, un coeficiente negativo indica una relación inversa; o sea, que el crecimiento es mayor cuando más bajo sea el valor de la variable climática. Además, el valor del coeficiente de correlación indica la significación de la relación entre el crecimiento y la variable climática.

El cálculo de las funciones respuesta basado en regresiones múltiples, asume que las relaciones entre el crecimiento y las variables climáticas son lineales. Sin embargo, en general, los procesos biológicos están basados en relaciones no-lineales (ter Braak y Prentice 1988). A pesar de ello, en el caso concreto que nos ocupa, podemos asumir que nos encontramos dentro de un rango de variación de los parámetros ambientales suficientemente estrecho para poder considerar que las relaciones crecimiento-clima son lineales. De hecho, las relaciones entre el clima (TM y PR mensuales) y el crecimiento radial de los árboles en los Pirineos obtenidas por Gutiérrez (1999), mediante el uso de redes neuronales se asimilan mucho más a una línea recta que a cualquier tipo de curva. Los resultados obtenidos en las FR deben interpretarse de forma precavida (puesto que cualquier relación demostrada mediante una regresión o correlación no prueba que exista una relación causal entre ambas variables). Sin embargo, según Pilcher y Gray (1992), las FR cuantifican los efectos del clima a lo largo del año y pueden interpretarse biológicamente.

La fiabilidad de los resultados ha sido contrastada mediante la técnica "boot-strap" (Efron 1979, Hughes *et al.* 1992, Efron y Tibshirani 1986, Guiot 1991). Esta técnica permite estimar los errores de los coeficientes de regresión de la FR, basándose en la variabilidad existente en las distintas estimaciones hechas a partir de las distintas submuestras tomadas del conjunto inicial de datos. El procedimiento, esquematizado en la figura 10, es el siguiente: a partir del conjunto de datos inicial se seleccionan los datos de crecimiento y de las variables climáticas de algunos años. Esta selección se realiza al azar y con reposición; es decir, que en cada selección, todos los datos tienen la misma probabilidad ($1/n$) de ser elegidos, independientemente que hayan sido previamente escogidos. De esta manera, algunas observaciones tendrán un peso mayor (2,3,..) mientras que, otras lo tendrán nulo al no haber sido seleccionadas en ningún caso. Las submuestras generadas tienen la misma dimensión que la serie de datos inicial. El número de simulaciones o de conjuntos de datos establecidos con el método "boot-strap" ha sido de 1000. Para cada uno de estos conjuntos se calcula la FR y, a continuación, se obtiene el valor promedio ($\bar{r}$) y la desviación estándar (ds) de los coeficientes de regresión parciales. Los errores de la estimación se estabilizan cuando el número de simulaciones es grande, superior a 30 según Keller (1999). Al mismo tiempo, este método también permite verificar el modelo de la FR, puesto que usa las observaciones que no han sido utilizadas en la calibración para calcular los valores de los coeficientes de correlación múltiple de la verificación de forma independiente a los de la calibración (Biondi y Waikul 2004).

La fiabilidad global de las FR se evalúa sobre el promedio y desviación estándar de los coeficientes de correlación obtenidos en la calibración (R_c y DS_c , respectivamente), sobre la media y desviación estándar de los coeficientes de correlación de la verificación (R_v y DS_v , respectivamente) de todas las FR establecidas. Es decir, las relaciones R_c/DS_c y R_v/DS_v constituyen una estimación de la adecuación del modelo. El valor de R_v , es además, un indicador de la varianza explicada por el modelo de regresión.

Por otro lado, la relación entre la media de cada coeficiente de regresión parcial y su desviación estándar ($\bar{r}/ds$), precisa el nivel de significación de la

relación y su signo, si la relación entre el crecimiento y la variable considerada es positiva o negativa. En todos los casos, los cocientes presentan una distribución normal si el número de interacciones es grande (superior a 500, en nuestro caso, 1000), y su nivel de significación se establece según los intervalos de una función de distribución normal, es decir:

$1,65 = R/DS < 1,96$	$p = 0,10$	(90%)
$1,96 = R/DS < 2,58$	$p = 0,05$	(95%)
$2,58 = R/DS < 3,29$	$p = 0,01$	(99%)
$R/DS > 3,29$	$p = 0,001$	(99,9%)

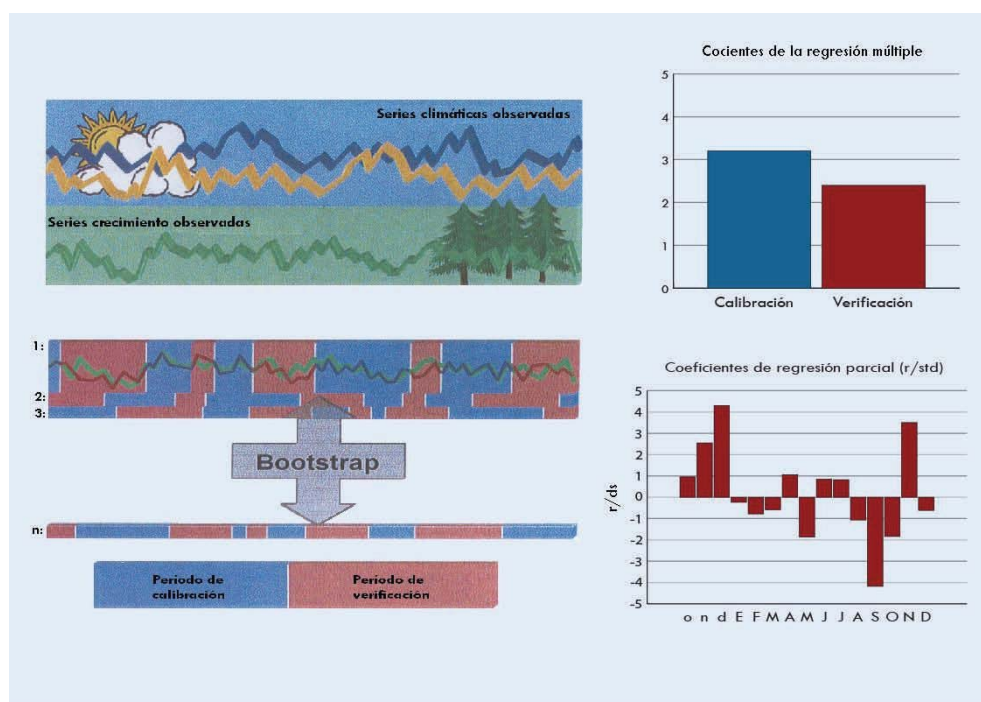


Figura 10. Esquema sobre el método “boot-strap” aplicado en el cálculo de las relaciones crecimiento-clima (funciones respuesta) para contrastar la significación de los cocientes de regresión parciales (r/ds) y de los cocientes de regresión de la calibración y de la verificación (R_c/DS_c y R_v/DS_v , respectivamente) del modelo.

Se han obtenido las FR para cada localidad de estudio, considerando el intervalo 1970-1999. Las series de datos climáticos utilizadas son: para el análisis a escala local, las PR y TM de la estación meteorológica más cercana a cada bosque; a escala regional, se han utilizado las series meteorológicas de las capitales de provincia promediadas (mediante previa ponderación); y para el análisis a escala global, se han utilizado los índices de teleconexiones climáticas.

En todos los casos, se obtuvieron los modelos de las FR de cada localidad considerando como variables independientes las PR y las TM mensuales del año en curso y de octubre, noviembre y diciembre previos a la estación de crecimiento. De hecho, según Bradley *et al.* (1985), las condiciones climáticas acontecidas antes del período de crecimiento condicionan fuertemente los procesos fisiológicos que tendrán lugar en el árbol durante la siguiente estación de crecimiento y, por lo tanto, influyen en el crecimiento futuro. En este sentido, los estudios de *P. halepensis* en el sur de Francia (Nicault 1999, Keller 1999, Serré 1973), en Grecia (Papadopoulos 1992) y en las Baleares (Pons 2002) revelan que, las precipitaciones del otoño-invierno previos a la estación de crecimiento, se relacionan positivamente con el crecimiento radial de esta especie. De esta manera, para cada localidad, se obtuvo una FR construida con 30 regresores (15 de precipitación y 15 de temperatura media). La inclusión de todas las variables de PR y TM de forma simultánea en el modelo de las FR se basa en la recomendación de Papadopoulos (1992) de considerar el efecto conjunto de dichas variables en los procesos del crecimiento radial. Además, tal y como se muestra en el capítulo I, ambas variables ejercen su propio efecto sobre las tasas de crecimiento radial del pino carrasco.

Según Tardif *et al.* (2003), el primer componente de un ACP basado en un conjunto de cronologías, contiene la información referente a aquellas condiciones climáticas regionales que han afectado al crecimiento de los árboles. Se extrajo el primer componente del ACP realizado para cada uno de los grupos de cronologías que, anteriormente, se delimitaron mediante un AC. Dicho análisis, se basó en la matriz de coeficientes de regresión parcial derivada de las FR locales. Es decir, la clasificación obtenida sintetiza qué conjuntos de localidades presentan una respuesta homogénea a las condiciones climáticas. Las FR regionales se obtuvieron utilizando como variables dependientes, las series de crecimiento regionales, y como predictores, las variables de TM y PR mensuales regionales (véase apartado correspondiente en la metodología).

Con el fin de revelar el efecto de la circulación atmosférica general sobre la respuesta del pino carrasco a las condiciones climáticas, se establecieron relaciones (FR) entre las series de crecimiento regionales y los índices de teleconexiones globales, que según la literatura influyen el clima de la zona mediterránea y, en concreto, de la Península Ibérica. En este último caso, se utilizaron como predictores los valores promedio estacionales de cada índice para el año en curso (t), y con uno ($t-1$) y dos ($t-2$) años de desplazamiento.

Finalmente, la estabilidad de las relaciones crecimiento-clima se evaluó a escala local y regional, de manera que se obtuvieron las FR por períodos de 30 años y con un desplazamiento de 10. Dicho de otro modo, los períodos analizados fueron: 1950-79, 1960-89 y 1970-99.