



UNIVERSITAT DE BARCELONA

U

B

Grup de Dendroecologia

Departament d'Ecologia

Facultat de Biologia

Av. Diagonal, 645

08028 Barcelona

Tel. 93 402 15 08

Fax 93 411 14 38

## SEGUIMENT DENDROECOLÒGIC DEL PI BLANC 2004



Treball realitzat per : Montserrat Ribas Matamoros  
Emília Gutiérrez Merino

## INDEX

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓ</b>                              | <b>1</b>  |
| Objectius                                       | 2         |
| Espècie                                         | 4         |
| La zona d'estudi                                | 5         |
| <b>MATERIALS I MÈTODES</b>                      | <b>8</b>  |
| Treball de camp                                 | 8         |
| Treball de laboratori                           | 9         |
| Validació de la datació                         | 10        |
| Establiment de la cronologia                    | 11        |
| Anàlisi de dades                                | 13        |
| Obtenció de les Funcions Resposta               | 14        |
| <b>RESULTATS</b>                                | <b>17</b> |
| Seguiment del creixement radial                 | 17        |
| Taxes de creixement                             | 17        |
| Variabilitat en les taxes de creixement         | 20        |
| Període i patró de creixement                   | 23        |
| Control del clima sobre les taxes de creixement | 25        |
| Sèries de creixement radial: cronologies        | 30        |
| Reconstrucció de la història recent del bosc    | 36        |
| Funcions resposta: relacions creixement - clima | 37        |
| <b>CONCLUSIONS</b>                              | <b>40</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>                             | <b>42</b> |

## INTRODUCCIÓ

La complexitat i multitud de factors que interactuen en els ecosistemes mediterranis, creen una gran perplexitat a l'hora de conèixer la seva capacitat d'adaptació a qualsevol tipus de canvi. En l'actualitat, aquest tema té un doble interès. En primer lloc, una de les preocupacions a nivell global és preveure la resposta dels diferents ecosistemes al present canvi climàtic per determinar-ne vies d'actuació. D'altra banda, sovint no es coneix prou bé com funcionen aquests sistemes per a fer-ne una gestió adequada.

El clima juga un paper central en el funcionament dels ecosistemes, raó per la qual l'estudi de la seva resposta als canvis en el clima, i dels mecanismes i processos implicats en aquesta resposta esdevé primordial. En la actualitat, el canvi climàtic és un fet cada cop més acceptat per la comunitat científica (Houghton *et al.*, 1996). Si bé és cert que no és el primer que s'esdevé a la història de la Terra, té com a peculiaritat que està sent accelerat a causa de l'activitat humana. Un dels efectes més clars i coneguts d'aquesta activitat antròpica a nivell global és l'augment en la concentració atmosfèrica dels gasos responsables de l'efecte hivernacle (especialment el CO<sub>2</sub>), el qual s'associa a l'escalfament del planeta. Així doncs, la temperatura de la superfície del planeta en aquest darrer segle ha augmentat, segons la regió, entre 0,4 y 0,8° C (Gates, 1994).

D'altra banda, diversos models de circulació general (*General Circulation Models*) prediuen per la regió mediterrània un escalfament de magnitud similar al valor mig global (1,2 – 3,5° C) en el present segle (Wigley, 1992). Aquests models també indiquen que s'està produint un canvi acusat en el règim de precipitacions, sobretot a nivell regional. D'aquesta manera, es preveu que en moltes àrees de la conca mediterrània no només augmentin les temperatures, sinó també disminueixi la disponibilitat hídrica, degut a una menor repartició de les pluges al llarg de l'any.

A la complexitat del canvi climàtic s'hi ha d'afegir un altre component del mateix: l'augment de la variabilitat i de la freqüència d'esdeveniments climàtics extrems (IPCC, 2001). La resistència i la capacitat de recuperació dels ecosistemes a aquests, és tant o més important per a la seva conservació que la seva capacitat d'adaptació als canvis graduals perquè, sovint, els efectes d'una pertorbació puntual poden perllongar-se durant força anys; debilitant els individus i fent-los molt més vulnerables a qualsevol altre factor que normalment no els causaria cap dany.

Cada vegada s'estan donant a conèixer més resultats de la recerca en Ecologia que posen de manifest que el canvi climàtic està afectant a tots els nivells d'organització dels ecosistemes (<http://www.ipc.ch/pub/un/syrspanish/spm.pdf>). El seu efecte és complex i no és homogeni; varia segons la regió i la espècie, degut a que les espècies responen de forma individual a la temperatura, a la concentració de CO<sub>2</sub> i als factors ambientals en general.

Aquest conjunt de canvis en les condicions climàtiques a la regió mediterrània, alhora incideixen directament en un augment espectacular del número d'incendis mantenint els ecosistemes forestals en fases inicials de la successió, on el pi blanc exerceix

un paper fonamental, ja que es tracta de l'espècie forestal pionera més abundant en la conca mediterrània occidental.

Els anells de creixement dels arbres són una font de dades ambientals molt valuosa degut a que l'activitat del càmbium (teixit meristemàtic secundari responsable del creixement en gruix dels arbres) és molt sensible a les condicions de l'entorn, i en els anells de creixement queda enregistrada la informació de tots aquells esdeveniments que han afectat a l'arbre al llarg de tota la seva vida amb resolució anual. La gran sensibilitat del càmbium i la resolució d'aquest tipus de registres, juntament amb l'elevada longevitat dels arbres fan que tota aquesta informació convenientment analitzada, sigui una eina molt adequada per l'estudi de processos ecològics i ambientals, tant en el present com en el passat.

La disciplina encarregada d'extreure, analitzar i interpretar la informació continguda en els anells de creixement dels arbres és la dendrocronologia – del grec *dendro* = arbre i *cronos* = temps –. Es basa en la datació correcta dels anells de creixement (assignant a cadascun d'ells, l'any del calendari durant el qual es va formar) i en l'anàlisi de les series dels anells, establint les cronologies (series temporals mitjanes representatives del creixement dels arbres d'una regió).

La dendrocronologia té moltes aplicacions en diferents camps de recerca. És particularment útil per a la reconstrucció de la història dels boscos, del seu règim de perturbacions, i per a posar de manifest quines condicions climàtiques limiten el creixement dels arbres (Camarero *et al.*, 1998; Gutiérrez, 1988, 1989, 1991). Històricament, la dendrocronologia s'ha aplicat amb èxit a l'estudi del clima (dendroclimatologia) actual i del passat (Fritts, 1976; Creus-Novau 1991-1992, Fernández & Manrique, 1997) basant-se en que la variabilitat interanual del clima afecta a tots els arbres d'una mateixa regió de forma simultània, de manera que les seqüències dels anells de creixement dels diferents arbres d'una mateixa zona mostren una gran sincronia. Aquesta resposta comú dels arbres permet identificar anys climàticament característics durant els quals la influència del clima sobre el creixement ha estat més acusada.

## Objectius.

L'elevada variabilitat intra i interanual del clima mediterrani dificulta la realització de prediccions sobre l'efecte que poden tenir els canvis en l'atmosfera i en el clima amb prou certesa. Per aquest motiu, l'estudi de l'efecte del canvi climàtic sobre les espècies mediterrànies necessita basar-se en seguiments sistemàtics de paràmetres ecològic-funcionals que descriguin l'estat fitosanitari i els processos d'activitat de les espècies més característiques dels ecosistemes mediterranis. A més, cal que aquests seguiments es realitzin durant un període de temps prou llarg (com a mínim una dècada) per a tenir representades la majoria de situacions climàtiques que es produeixen en l'actualitat.

Per tots aquests motius, des de l'abril del 1995 s'està duent a terme un seguiment de l'estat fitosanitari i el creixement en gruix del tronc de 10 individus de pi blanc (*Pinus halepensis* Mill.) al P.N. del Garraf. L'elevada sensibilitat del càmrium a les condicions ambientals, juntament amb el fet que es tracta de producció secundària, és a dir, que només té lloc un cop la planta ha cobert totes les seves necessitats més bàsiques (activitat fotosintètica, producció i acumulació de reserves i renovació foliar); fan que el creixement en gruix del tronc sigui un paràmetre ecològic integrador de l'estat fitosanitari del individu, alhora que denota quins factors ambientals en condicionen el seu desenvolupament.

El objectiu principal d'aquest seguiment és posar de manifest quines són les regularitats i els patrons temporals del creixement radial d'aquesta espècie, i la seva relació amb les condicions climàtiques que han esdevingut any rera any. Un cop obtinguda aquesta informació, el següent pas és establir quines condicions climàtiques regulen el seu desenvolupament, per així preveure l'evolució de la població sota els efectes del canvi climàtic actual. En base als resultats obtinguts es podran determinar quines mesures de gestió forestal poden ajudar al manteniment de masses forestals sanes, amb rendiments d'explotació, i en darrer terme a la conservació d'un paisatge típicament mediterrani.

El propòsit principal d'aquest estudi es pot desglossar en els següents objectius parcials:

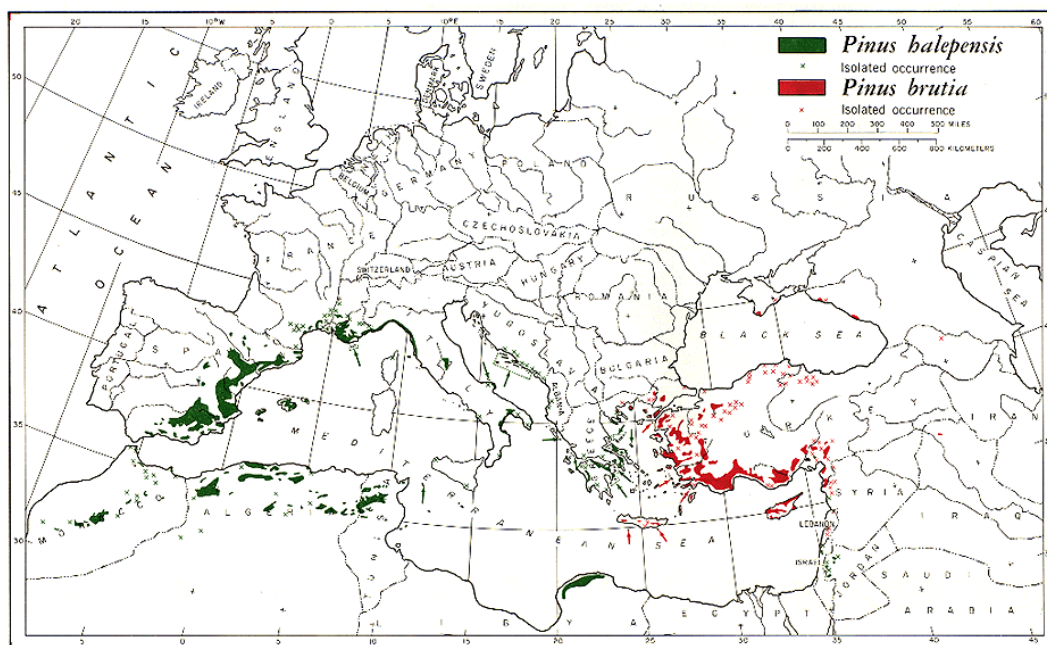
-  Posar de manifest els períodes d'activitat i repòs del creixement del tronc del pi blanc al P.N. del Garraf.
-  Establir quines condicions climàtiques han regulat el creixement radial (creixement en gruix del tronc) del pi blanc al Garraf en cadascun dels anys del seguiment.
-  Descriure i analitzar la història recent d'una massa forestal representativa de les poblacions de pi blanc madures ubicades dins el Parc.
-  Posar de manifest si existeixen diferències en quines condicions climàtiques controlen el creixement radial del pi blanc entre arbres adults que constitueixen les masses forestals i entre arbres adults que creixen isolats, i comparar-les amb les relacions creixement – clima obtingudes d'arbres joves (en els que s'està duent a terme el seguiment).

En resum, l'objectiu global és caracteritzar les condicions climàtiques que s'han donat cada any del seguiment i posar de manifest com han afectat el creixement del pi blanc d'una forma exhaustiva i rigorosa, per així disposar d'una base sòlida sobre la qual dur a terme programes de gestió adequats i eficients que alhora fomentin la difusió del valor ecològic i paisatgístic del Parc Natural del Garraf a tots els nivells.

## Espècie.

La importància de *P.halepensis* a Espanya no sols es deu a la gran extensió superficial, unes 900.000 ha. de masses naturals i unes 300.000 ha. de repoblació, sinó que també rau en el paper que té en tasques de restauració de la coberta vegetal ja que és una espècie resistent a la sequera i de ràpid creixement (Cámara, 1999). La primera, és una característica de gran rellevància degut al fet que els darrers episodis climàtics han comportat un increment dels incendis forestals.

Atenent les seves característiques ecològiques, el pi blanc es defineix com una espècie pionera. Pels llocs on predomina, és xerofítica, termòfila i pot desenvolupar-se en tot tipus de sòls. La seva àrea de distribució comprèn tota la regió mediterrània occidental, ja que la resta de la regió mediterrània és ocupada per la seva espècie vicariant, *Pinus brutia* (Fig. 1).



**Figura 1.** Àrea de distribució de *Pinus halepensis* i *Pinus brutia*.

D'altra banda, la seva gran capacitat colonitzadora la fa apte per a ésser utilitzada en nombrosos treballs de repoblació en llocs en els que molt poques espècies podrien prosperar degut a sòls poc profunds o a determinades característiques edàfiques, a la manca d'aigua, o a les temperatures massa elevades o baixes (Folch, 1981). De fet, *P.halepensis* és indiferent al tipus de sòl, pot créixer en tot tipus de substrats, des de guixos als Monegros fins a substrats calcaris (Massís del Garraf) o silícics; és l'espècie forestal que creix amb només 300 mm de precipitacions anuals (Ceballos & Ruíz de la Torre, 1979) i suporta un rang de temperatures de -10 a -20° C durant alguns períodes hivernals a les

regions del nord Peninsular fins a 50° C a les regions del sud d'Espanya a l'estiu (Larcher, 1977).

A la Península, les característiques climàtiques redueixen la seva àrea de distribució a l'est Peninsular, a les zones de baixa altitud, i el seu caràcter poc competitiu la situa en zones en les que les condicions edàfiques i climàtiques són poc favorables per a la majoria de les espècies forestals (Folch, 1981; Costa *et al.*, 1998). Degut a l'hàbitat que ocupa, l'estat de conservació d'aquestes comunitats boscoses és amb freqüència precari. Potser sigui una de les coníferes més afectada per l'activitat humana per la intensa transformació que ha sofert per part de l'home el seu nínxol ecològic- substitució per camps de conreu o pastures, cremes i rotacions periòdiques de control del matollar, incendis, etc.- si bé encara perduren taques poc intervingudes-. D'aquesta manera, ressalta el seu gran paper en la protecció enfront de l'erosió de la coberta del sòl i en la colonització de camps abandonats i zones afectades per incendis. A més, la comunitat vegetal que aquesta espècie forma, proporciona les condicions necessàries per a l'establiment d'altres espècies vegetals, així el pi blanc proporciona les condicions d'ombra que els plançons d'alzina necessiten per establir-se i sobreviure.

No obstant, malgrat aquests coneixements generals (que acostumen a ser fruit d'observacions i descripcions de les localitats en les quals es troben les masses forestals de pi blanc), es coneix molt poc sobre la capacitat d'adaptació de l'espècie i de com pot respondre al canvi climàtic: augment de temperatura i dels fenòmens climàtics extrems. Amb relació a l'últim aspecte, podem citar com exemples, l'anticicló persistent durant l'hivern de 1989, la sequera extrema a l'estiu del 1994, gelades al mes de maig del 1997 i el fred intens i sostingut al desembre de 2001, que causà la mort de bastants arbres i l'acusada defoliació en d'altres en alguns boscos de pi blanc situats en valls interiors de la conca de l'Ebre. La resposta de l'espècie a cadascuna d'aquestes condicions no es coneix, i la importància del seu coneixement rau en el fet que en les darreres dècades, cada any es donen diferents fenòmens climàtics que trenquen totes les mitjanes històriques dels registres climàtics, sobretot en les darreres dècades. De manera que la gran variabilitat de situacions climàtiques que s'han produït en els darrers anys, atenent a la durada, intensitat i moment de l'any en el que es dona l'esdeveniment climàtic desfavorable, proporciona un conjunt de condicions ambientals que permeten analitzar la resposta del pi blanc a l'elevada variabilitat climàtica i quins han estat els factors més favorables i més desfavorables pel seu creixement.

### La zona d'estudi.

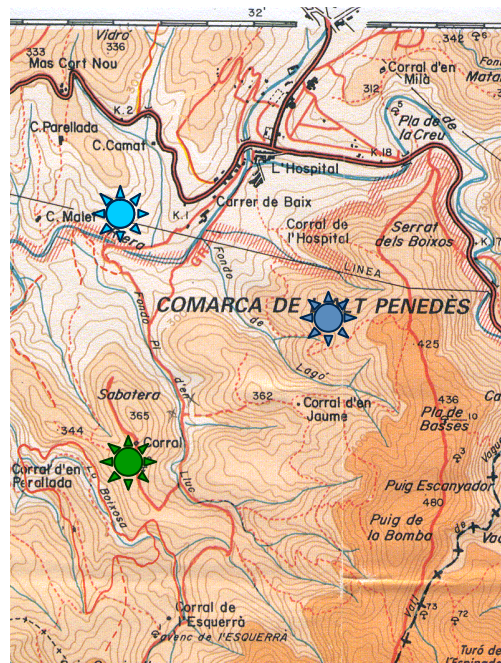
El Massís del Garraf està situat al sector sud-oest de la Serralada Litoral, entre la Vall del Llobregat, la depressió del Penedès i la mar Mediterrània. La zona d'estudi es troba en una vall interior del massís (41°20'26" N, 01°50'38" E, 300 m snm.), a 40 Km de Barcelona i a 8 Km de la localitat de Begues (1° 31' E i 41° 21' N; 360 m snm.).

La geologia de la zona està formada per una coberta gruixuda i compacta de dolomies i calcàries del Juràssic i Cretaci que es troben sobre materials Paleozoics. Al capdamunt de tot són freqüents les sorres i llims del quaternari deltaic (Panareda, 1986).

El relleu del Garraf, és càrstic, causat per l'acció erosiva de l'aigua sobre les roques calcàries mitjançant fenòmens de corrosió superficial i subterrània. Alhora però, es tracta d'un mosaic tectònic ple de fractures i dislocacions d'un bloc que està inclinat cap al sud-oest. En tota l'àrea d'estudi, els afloraments rocosos són abundants i creen discontinuïtats en el sòl. La roca mare està formada per calcàries secundàries (margues i dolomies del Mesozoic) amb gran capacitat d'infiltració d'aigua (Riba *et al.*, 1979).

Segons Rivas-Martínez (1985), la zona d'estudi pertany al pis mesomediterrani, i la comunitat que li correspondria (vegetació potencial) seria un alzinar (sèrie *Viburno tini - Querceto ilicis sigmetum*), donat el seu clima mediterrani genuí càlid, relativament poc sec i amb hiverns temperats. A més, segons aquest autor, el sòl no imposa grans limitacions pel creixement de boscos productius, tot i que es tracta d'un aridisol del grup dels calciòrthids.

La figura 2 mostra la localització de les zones d'estudi. L'estrella verda indica la situació de l'àrea en la que s'està duent a terme el seguiment de 10 individus de pi blanc (5 en cada vessant); i la blava, la localització dels arbres d'on s'han extret els testimonis de fusta per a l'estudi de la història del bosc i de l'efecte del clima sobre el creixement radial del pi blanc al llarg dels darrers 50 anys. En blau fosc s'indica la situació del bosc d'estudi; i en blau clar, la dels arbres isolats.



**Figura 2.** Situació topogràfica de les poblacions d'estudi. En verd, situació dels 10 individus del seguiment (5 a cada vessant); en blau fosc, situació del bosc madur; i en blau clar, la dels arbres isolats. Extret del mapa topogràfic 1/25.000 de l'Alpina (1996).

La zona on es realitza el seguiment es va cremar completament l'any 1982 i actualment, la cobertura vegetal al vessant nord (NNE) és del 85% i al sud (SSW) és del 80%. A la solana, la vegetació està formada per matolls, on l'espècie dominant és el garric (*Quercus coccifera*), seguit del llentiscle (*Pistacia lentiscus*) que recobreix un 6-10% de la zona. Al vessant nord, el garric és menys dominant degut a la major presència d'alzines i de pi blanc. La vegetació de cada vessant es correspon amb un dels dos grans dominis de vegetació del Garraf: la màquia de garric i margalló (associació *Quercetum-lentiscetum*) i l'alzinar litoral (associació *Quercetum ilicis galloprovinciale*). A la solana, hi trobem la màquia de garric i margalló, mentre que a l'obaga hi ha les espècies de l'alzinar litoral.

La vegetació actual del bosc estudiat és una brolla calcícola amb un estrat arbori format exclusivament per pi blanc fruit de l'abandonament de camps de conreus (encara s'hi observen restes d'antics bancals). El sotabosc està format principalment per garric.

## MATERIALS I MÈTODES

### Treball de camp.

Al juliol del 1995 es van seleccionar 10 individus de pi blanc, 5 al vessant nord (del Ph-6 al Ph-10) i 5 a la solana (del Ph-1 al Ph-5). Per determinar l'activitat del *càmbium* (increments en el gruix del tronc), es va instal·lar al tronc de cada arbre un dendròmetre de banda (Fig. 3) a una alçada superior als 0.5 m del terra. El diàmetre mig dels pins a aquesta alçada era de  $2.85 \pm 0.56$  cm (N) i  $2.38 \pm 0.57$  cm (S). Cada 15-30 dies, segons l'època del any (amb més freqüència a la primavera i a la tardor), s'han mesurat els increments en perímetre de cada arbre emprant un peu de rei electrònic. La precisió de l'aparell de mesura és de 0,01 mm. Amb la mateixa freqüència, també s'ha quantificat el creixement dels brots (cinc per arbre), de les acícules (tres per brot), de les pinyes (totes les dels brots seleccionats), i s'han realitzat descripcions sobre l'aspecte fitosanitari de cada arbre i la seva fenologia reproductiva.



**Figura 3.** Dendròmetre de banda instal·lat en un pi blanc del Garraf per mesurar els increments en el perímetre del tronc. (Fotografia: Montserrat Ribas, 2002).

D'altra banda, es va seleccionar una zona homogènia dins una massa forestal relativament madura i que fos representativa de les poblacions de pi blanc que trobem al

Massís del Garraf. Aquesta zona d'aproximadament mitja hectàrea ha servit per a descriure la comunitat vegetal, la geologia, l'edafologia i l'estructura del bosc.

Dels arbres més vells de la massa forestal es van extraure dues mostres (testimonis de fusta o *cores*), seguint radis diferents per a recollir la variabilitat en el creixement dins cada arbre, ja que el creixement radial del tronc no acostuma a ser concèntric. L'extracció de les mostres es fa mitjançant l'ús de barrines Pressler de 0,5 cm de diàmetre interior, tal i com mostra la figura 4. L'alçada d'extracció de les mostres és aproximadament a 1,30 m (D.A.P). De cada arbre s'han pres mesures de l'alçada, diàmetre a l'alçada del pit (D.A.P), alçada d'extracció de la mostra, i el gruix d'escorça i d'albeca (àrea conductora) de cada mostra. També s'han fet, quan ha estat necessari, observacions generals de l'estat de l'arbre (presència de ferides i/o podridures, anomalies en el creixement, grau de dominància, etc.). Les dades referents a la densitat i àrea basal del bosc s'han basat en una parcel·la de 20\*20 m. Amb la finalitat de contrastar els efectes de la pròpia dinàmica del bosc sobre el gruix dels anells de creixement i de si hi ha diferències en les relacions creixement - clima, també s'han extret *cores* de vuit arbres que creixen de forma bastant isolada en les fissures de les roques calcàries.



**Figura 4.** Extracció d'un testimoni de fusta mitjançant l'ús d'una barrina Pressler.

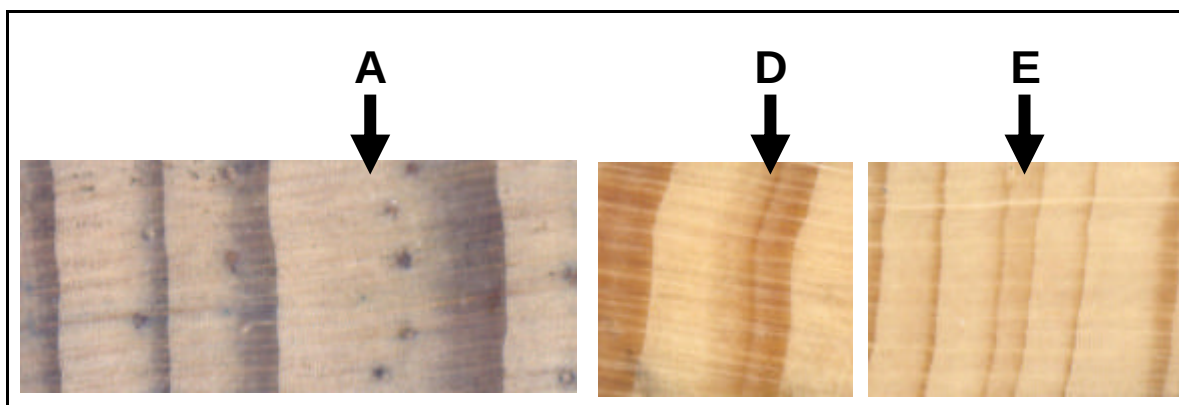
### Treball de laboratori.

#### Datació i sincronització de les sèries d'anells.

Els testimonis de fusta o *cores* extrets dels arbres, un cop deixats assecar a temperatura ambient, s'enganxen sobre unes guies de fusta dissenyades expressament. Posteriorment, per a visualitzar clarament els anells s'han de llisar els *cores* amb papers de vidre de gra successivament més fi. La datació de cada anell s'ha fet seguint el mètode proposat per Yamaguchi (1990). La datació s'inicia per l'últim anell format, sota l'escorça, el qual correspon al creixement de l'any d'extracció de la mostra o a l'anterior (depenent

de si la data d'extracció de la mostra es realitza durant l'època de creixement o abans d'aquesta, respectivament). A partir d'aquest anell es va comptant cap enrera en el temps assignant a cada anell l'any de calendari en el qual es va formar; alhora es comprova la situació temporal dels anells característics per tal de detectar anomalies en el creixement de l'arbre com per exemple els anells absents o falsos anells. Es consideren anells característics entre d'altres, els que són molt estrets o molt amples, els anells de gelada, els que presenten canvis de densitat a la banda de fusta tardana de l'anell i els que la tenen molt clara, molt fosca o molt ampla (Fig. 5).

Tot el procés de datació, identificació dels anells i sincronització de les mostres es realitza examinant-les visualment sota una lupa binocular. Després es mesura el gruix dels anells mitjançant un aparell de mesura semiautomàtic connectat a un ordinador (Aniol, 1983). La precisió de les mesures és de 0,01 mm.



**Figura 5.** Imatges d'anells característics. A, anell ample; D, Anell amb canvis de densitat; E, Anell estret.

#### Validació de la datació.

Per confirmar i validar les datacions i sincronitzacions visuals, les sèries del gruix dels anells són comparades amb mètodes estadístics mitjançant el programa COFECHA (Holmes, 1983). La validació consisteix a examinar la correlació de cada sèrie (conjunt de mesures d'un *core*) amb la sèrie mitjana, la qual s'obté utilitzant la resta de les sèries de la mateixa localitat, i es fa servir provisionalment, com a sèrie de referència. Les correlacions es calculen després d'eliminar: (i) la tendència deguda a l'edat de l'arbre mitjançant l'ajust de funcions matemàtiques, i (ii) l'efecte de la dependència del creixement d'un any amb els anys anteriors ajustant models autoregressius, normalment d'ordre 1 o 2. A vegades però, pot passar que hi hagi segments que presentin creixements anòmals o que tinguin correlacions baixes amb la sèrie de referència. Aquests s'han de tractar per separat (Blasing *et al.*, 1983) i si la correlació no millora- segueix essent no significativa- són eliminats.

### Establiment de la cronologia.

En els estudis sobre producció i dinàmica forestal s'acostuma a treballar amb les sèries de creixement brut, donat que l'objectiu és conèixer quanta fusta (en termes absoluts) han produït els arbres d'una localitat cada any. En canvi en estudis dendroclimàtics es treballa amb els índexs de creixement o cronologies.

Les cronologies són les sèries mitjanes estandarditzades del gruix (o qualsevol altra mesura, com per exemple la densitat de la fusta o la concentració d'algun isòtop) dels anells de creixement dels arbres d'una localitat. El mètode d'estandardització pot variar en funció dels objectius a assolir, ja que la variable mesurada (el gruix dels anells de creixement, en aquest cas) està influenciada per factors molt diversos, i l'estandardització consisteix en primer lloc en fer que totes les sèries de creixement individual de cada arbre siguin comparables entre sí. En termes matemàtics això significa que les sèries han de ser estacionàries, o sigui, amb una mitjana constant. I en segon terme, en extraure tota aquella informació continguda en el gruix dels anells de creixement no relacionada amb el factor que es vol estudiar, per evitar que d'altres factors emmascarin els resultats.

Com a model general i molt simplificat (doncs no contempla la interacció entre factors diferents) es pot entendre el creixement anual d'un arbre com la combinació lineal de diferents factors (Cook & Kairiukstis, 1990). La seva expressió matemàtica és:

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

**A<sub>t</sub>** és el gruix de l'anell a l'any t.

**E<sub>t</sub>** és el valor del gruix de l'anell corresponent a la tendència de l'arbre deguda a la seva edat (això és fruit que cada any s'ha d'afegir fusta a un diàmetre de xilema creixent, amb lo qual encara que hi afegeixin la mateixa producció, el gruix de l'anell serà més petit).

**C<sub>t</sub>** és l'efecte de les condicions climàtiques de l'any t sobre el creixement.

**P1** y **P2** són els efectes de diferents tipus de pertorbacions sobre el creixement; P1 representa les pertorbacions endògenes del bosc (les degudes a la pròpia dinàmica i /o explotació forestal, com per exemple la competència) i que per tant no afecten a tots els arbres del bosc de la mateixa manera. Mentre que P2 representa les pertorbacions exògenes, per exemple l'efecte d'un incendi o un moviment del terreny, que afecta a tots els arbres de la zona.

**U<sub>t</sub>** és la variabilitat en el gruix dels anells no explicada per la resta de factors.

**d** és l'indicador binari de la presència o absència de la pertorbació.

Aquest model senzill serveix per a posar de manifest que segons els objectius de cada estudi, en l'estandardització interessa eliminar causes de variabilitat temporal en les sèries per així ressaltar el possible efecte dels factors que es volen estudiar.

Tradicionalment, els estudis dendroclimàtics s'han dut a terme treballant amb mostres d'arbres que han crescut en boscos oberts o de forma aïllada, i per tant que no han

estat afectats per pertorbacions (com per exemple les degudes als canvis en l'estructura demogràfica del bosc), de manera que les series de creixement només inclouen l'efecte d'afegir un anell a un diàmetre cada cop més gran o tendència deguda a l'edat (Et). Els mètodes d'estandardització per aquest tipus de series estan molt ben definits donat que la dendroclimatologia es una disciplina bastant antiga i té una metodologia establerta i àmpliament contrastada (Fritts *et al.*, 1969; Fritts, 1971; Fritts, 1976; Cook & Kairiukstis, 1990; Schweingruber, 1996).

Aquests estudis han estat molt útils per establir quins factors ambientals (climàtics i del entorn dels arbres) afecten el seu creixement, per a la reconstrucció del clima en el passat i l'estudi de la seva variabilitat, o fins i tot per predir el creixement dels arbres sota les condicions climàtiques futures predites pels Models de Circulació General (GCM). No obstant, és possible que les relacions creixement - clima siguin diferents dins de masses forestals, ja sigui per l'efecte de protecció que exerceixen els arbres entre sí o per les diferències en les condicions de l'entorn que acostumen a tenir els boscos (per exemple, el tipus de sòl acostuma a ser més profund). Quan s'intenten realitzar estudis dendroclimàtics amb sèries del gruix dels anells amb les sèries del interior dels boscos, extraure el component climàtic de les sèries esdevé més complicat. Això és degut a que existeixen factors com la competència, les pertorbacions i la pròpia dinàmica i història del bosc (successió) que creen soroll en les sèries entorpint la seva modelització, donat que en moltes ocasions aquests factors tenen un caràcter esporàdic.

La majoria de les tècniques d'estandardització emprades en dendroclimatologia (regressions lineals, corbes exponencials modificades, *cubic splines*, etc.), no tenen la suficient flexibilitat per extraure la variabilitat no deguda al clima en sèries del interior del bosc. Les *cubic smoothing splines* en canvi, són les millors candidates per aquest tipus d'anàlisi per dos motius. En primer lloc, per ser un tipus de funcions en les que es pot regular la seva flexibilitat; i en segon lloc, perquè són aquestes funcions les que des dels anys 80 s'han anat millorant en nombrosos treballs (Reinsch, 1967; Rice, 1969, World, 1974; Cook & Peters, 1981 i Cook & Kairiukstis, 1990) fins a esdevenir les funcions més utilitzades en dendroclimatologia. Tot i així, no sempre és fàcil determinar quina flexibilitat ha de tenir la *spline* ajustada a cada sèrie per aconseguir extraure la major variabilitat de baixa freqüència i la menor d'alta freqüència.

Per tots aquests motius i basant-nos en estudis previs del grup de dendrocronologia de la Universitat de Barcelona - basats en l'estudi d'una xarxa de 28 cronologies de pi blanc distribuïdes al llarg de l'est Peninsular (dades no publicades)- totes les series han estat estandarditzades mitjançant l'ajust d'una funció *spline* de 25 anys de longitud.

Totes les anàlisi s'han fet amb el software estàndard utilitzat en dendrocronologia, el paquet informàtic ITRBD 2.1. El programa informàtic emprat per a calcular les cronologies ha estat el ARSTAN i el mètode escollit per a realitzar les mitjanes de les sèries per obtenir la cronologia ha estat el *biweight mean*, que és el mètode més recomanat per a treure els efectes de la dinàmica interna del bosc i ressaltar les respostes i/o tendències comunes en les sèries de dades dels anells de creixement (Cook & Kairiukstis, 1990). L'extracció dels índexs dels models ajustats s'ha realitzat dividint el valor del gruix

de l'anell pel de la funció ajustada, doncs es el mètode més adequat quan es treballa dins de poblacions forestals.

### **Anàlisi de les dades.**

A partir de les mesures dels dendròmetres s'han calculat les taxes de creixement en perímetre per cada data de mostreig, fent el quocient entre el increment en perímetre del tronc de cada arbre i el número de dies transcorreguts entre les dues sortides de camp consecutives. Les taxes de creixement radial de cada arbre s'han comparat amb la resta mitjançant dos mètodes diferents. Una primera comparació s'ha realitzat amb el coeficient de correlació de Spearman,  $r_s$ . S'ha triat aquest perquè no assumeix linealitat en la relació existent entre les dues series a comparar, i és menys sensible als valors extrems que d'altres coeficients de correlació. D'aquesta manera, s'ha comprovat el grau de sincronització entre les series individuals de creixement de cada vessant, i entre els dos vessants. Una segona comparació s'ha realitzat mitjançant l'anàlisi de components principals (PCA) amb la finalitat de ressaltar la homogeneïtat entre les series individuals de creixement radial. El PCA s'ha basat en la matriu de covariàncies per a minimitzar l'efecte que el creixement d'alguns arbres es major que el d'altres (ter Braak, 1987). Aquest anàlisi multivariant serveix per a representar la variabilitat existent en un conjunt de dades en un espai de dimensions reduïdes, de manera que el resultat es un diagrama d'ordenació indirecte, en el qual els arbres queden situats més propers quan més semblants siguin els seus patrons temporals de creixement radial. El PCA s'ha realitzat amb el programa CANOCO ver. 4.0.

Un cop comprovades la sincronia i homogeneïtat en les series de creixement de tots els arbres, s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard de les taxes de creixement radial de cada vessant.

Per a establir quines variables climàtiques tenen efecte sobre el creixement, quan el tenen, i de quina manera, s'ha treballat amb les dades enregistrades a l'estació de Garraf - Begues (41°17'20'' N, 1°54'32'' E, 360 m snm.) que pertany a la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya (X.A.C.) del Servei de Meteorologia del Departament de Medi Ambient (Generalitat de Catalunya). Les variables considerades han estat: la temperatura mitjana, la precipitació, la radiació solar incident i les hores de llum diàries. S'ha treballat amb dades meteorològiques diàries per a poder calcular el seu valor mitjà entre dies consecutius de mostreig, i així tenir la mateixa resolució temporal que amb les taxes de creixement radial.

Per establir quins factors de l'entorn immediat dels arbres afecten el seu creixement radial s'ha realitzat un anàlisi de redundàncies (RDA). Aquest, és un mètode d'ordenació multivariant semblant al PCA, però en aquest cas es tracta d'un mètode directe (Legendre & Legendre, 1998). És a dir, en el que els eixos que descriuen la màxima variabilitat possible en la matriu de dades inicials (creixement radial dels arbres) estan restringits a ser combinacions lineals de les variables ambientals proporcionades (en aquest cas, totes les que es mostren a la taula 1). Malgrat que en general, els processos biològics estan basats en

relacions no lineals (ter Braak *et al.*, 1988), en aquest cas concret podem assumir que ens trobem dins un rang de variació de les condicions ambientals prou estret com per considerar que les relacions son lineals. La selecció de les variables que expliquen una porció de la variabilitat en el creixement prou significativa s'ha dut a terme mitjançant el test de Montecarlo comparant la distribució de freqüències de les dades amb la construïda amb les 999 permutacions a l'atzar de les dades i seleccionant només aquelles que tenen un efecte significatiu al 95% ( $p < 0,05$ ). A més, la selecció de les variables s'ha realitzat de forma esglaonada per evitar introduir variables que aportessin informació redundant.

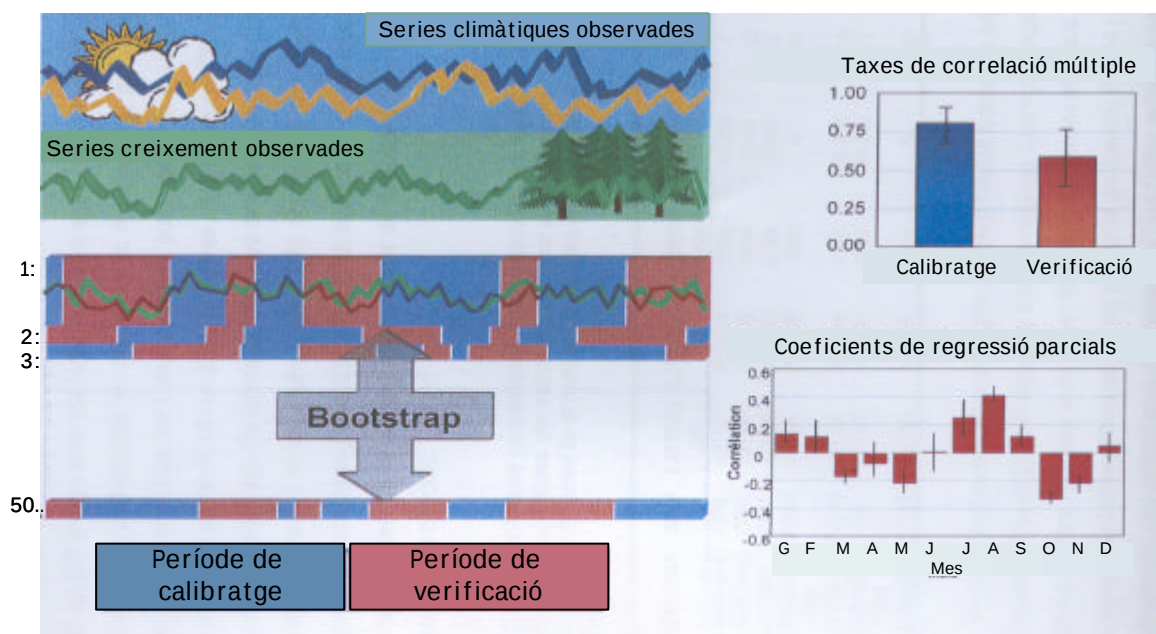
### **Obtenció de les Funcions Resposta: relacions creixement - clima.**

Des dels inicis de la dendroclimatologia s'han desenvolupat diverses tècniques estadístiques per a estimar la resposta dels arbres al clima (Fritts, 1962, 1976, 1991). Aquest procediment consta de dos passos: obtenció del model matemàtic o funció resposta que relaciona el creixement dels arbres amb les variables climàtiques (calibratge) i la comprovació que el model obtingut és estadísticament significatiu (verificació).

Els primers mètodes emprats per a l'obtenció d'aquests models es basaven en simples regressions múltiples (Fritts, 1976), però no donaven resultats molt acurats donat que les variables climàtiques estan intercorrelacionades entre si. Tot i que són prou indicadors de certes tendències. Posteriorment, la introducció de l'anàlisi de regressió després d'extreure les components principals va contribuir notablement en la millora de les estimacions de les funcions resposta. L'anàlisi de components principals proporciona noves variables independents que són les que s'utilitzen posteriorment per a fer la regressió múltiple (Cook & Kairiukstis, 1990), i els coeficients parcials de la regressió representen la relació entre les variables considerades (ex: creixement radial - variables climàtiques). Els coeficients positius indiquen una relació directa entre el descriptor forestal (creixement) i la variable climàtica mensual considerada, i significa que quan més alt sigui el valor de la variable més creixeran els arbres. De la mateixa manera, un coeficient negatiu indica una relació inversa, el creixement serà major com més baix sigui el valor que prengui la variable climàtica. En el present estudi el resultat és un model en el que la variable dependent és el creixement radial, i les independents són les variables climàtiques mensuals, cadascuna de les quals té associat un coeficient de regressió parcial. El valor dels quals indica la seva significació, és a dir, si la relació entre la variable climàtica i el creixement és significativa.

La fiabilitat dels resultats (coeficients de les funcions resposta) ha estat contrastada mitjançant la tècnica "boot-strap" (Efron, 1979; Hughes *et al.*, 1982). Aquest mètode permet estimar els errors dels coeficients de regressió de la funció resposta estudiant la variabilitat de les estimacions fetes a partir de submostres preses del conjunt de dades inicials (Fig. 6). El procediment és el següent: a partir del conjunt de dades inicial es seleccionen dades a l'atzar. Cada vegada, totes les dades tenen la mateixa probabilitat ( $1/n$ ) d'ésser escollides, independentment de que ja hagin estat escollides prèviament. D'aquesta manera, algunes observacions tindran un pes més elevat (2, 3, ...) mentre que d'altres tindran un pes nul en no haver estat seleccionades cada vegada. El número de simulacions,

és a dir, de conjunts de dades establertes amb el "boot-strap", ha estat de 999. Per cadascun d'aquests conjunts de dades es calcula la funció resposta; el valor mitjà dels errors de l'estimació s'estabilitza quan el número de simulacions és gran (superior a 30, segons Keller, 1999).



**Figura 6.-** Metodologia de les funcions resposta o de la regressió múltiple després d'extreure els components principals. Els histogrames de la esquerra mostren: a dalt, els coeficients i desviació estàndard de correlació del calibratge i la verificació del model (regressió múltiple); i a baix, els coeficients parcials, es a dir cada coeficient de regressió associat a cada predictant o variable climàtica. Quan la desviació estàndard d'aquests coeficients no creua el valor 0, indica que són significatius.

La tècnica "boot-strap" és particularment útil quan les distribucions dels paràmetres són complexes o desconegudes, fet que acostuma a donar-se en mètodes multidimensionals.

Aquest mètode també permet verificar, al mateix temps, el model de la funció resposta ja que fa servir les observacions que no han estat emprades en el calibratge per a calcular els valors dels coeficients de correlació múltiple de forma independent. Els valors mitjans i els errors tipus de les funcions resposta de la verificació proporcionen els intervals de confiança al 90% permetent comprovar la fiabilitat del calibratge.

S'han obtingut les funcions resposta per a les dues cronologies establertes (creixement dels arbres de dins el bosc, i el dels arbres isolats que creixen damunt les roques), considerant el interval que cobreix el darrer mig segle (1951-1999), per ser el període màxim de temps comú a les dues cronologies i a les sèries climàtiques.

Les variables climàtiques considerades han estat les precipitacions totals mensuals, les temperatures mitjanes mensuals, el quocient precipitació/temperatura mitjana, les temperatures mitjanes de les màximes i de les mínimes mensuals, i les temperatures màximes i mínimes absolutes mensuals (84 variables) de l'observatori de Begues. Prèviament a l'establiment del model definitiu, s'han establert les relacions entre el creixement i totes les variables climàtiques, és a dir, unes funcions resposta provisionals. Aquest anàlisi ha servit per a poder escollir les variables que tenen un efecte important en el creixement radial de forma gradual. Aquest procediment s'ha realitzat diverses vegades fins a obtenir un model de regressió múltiple significatiu, en el qual la majoria de les variables climàtiques introduïdes tenen un efecte significatiu sobre el creixement de la localitat. Així s'evita introduir moltes variables que no tenen efecte en el model definitiu, i per tant generen soroll causant que el model global de la funció resposta no sigui significatiu. S'ha pogut establir les mateixes funcions resposta (en les que hi participen les mateixes variables climàtiques) per a les dues poblacions d'arbres donat que les dues estan afectades de la mateixa manera per les condicions climàtiques. D'aquesta manera, podrem contrastar més fàcilment i amb més certesa si existeixen diferències en l'efecte de les condicions climàtiques sobre el creixement dels arbres del bosc i del que creixen isolats.

## RESULTATS

### Seguiment del creixement radial del pi blanc. Període 1995-2004.

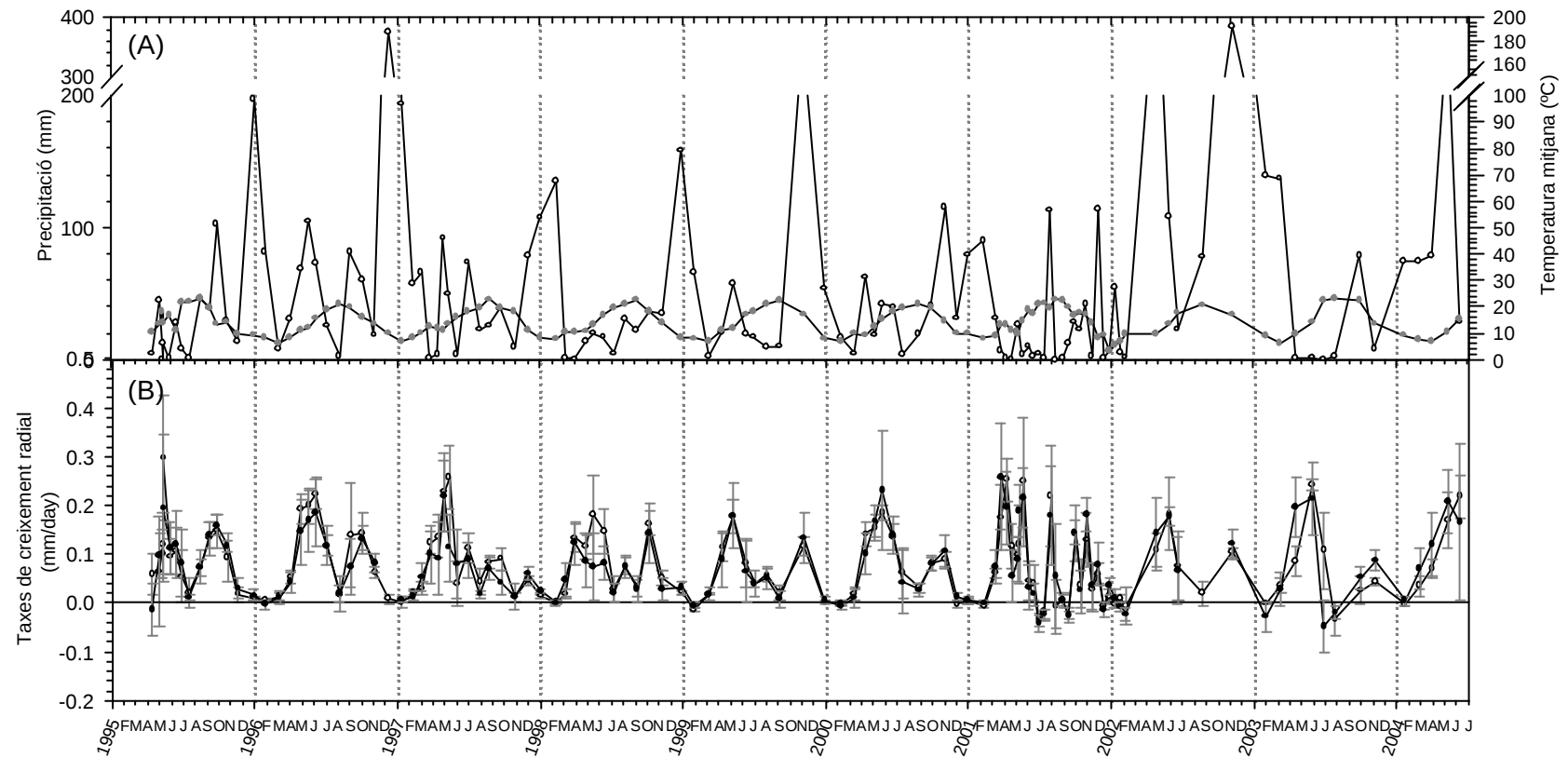
#### Condicions climàtiques.

La figura 7A mostra l'evolució de la temperatura mitjana (TM) i la precipitació acumulada (P) entre dies de mostreig consecutius al llarg de tot el seguiment (des de l'abril del 1995 fins al juliol del 2004). Les escales de les abscisses mantenen la relació considerada per Gaussen (2P:TM), de manera que el període de temps en el que les TM superin les P en la figura es correspon amb el que es defineix com a període sec (Bagnouls, 1953). La figura mostra que existeix una elevada variabilitat climàtica (tan intra- com interanual), i que la sequera estival es dona la majoria d'anys, tot i que en alguns anys, com per exemple el 2002, aquesta pot ser molt minsa. La sequera del 2003 ha estat la més severa, seguida de la del 1995. Les condicions climàtiques més favorables pel desenvolupament vegetal, considerant la distribució de les pluges al llarg de l'any, s'han donat en els anys 2002 i 1996. Aquests anys han estat força plujosos, i el període sec fou curt i menys pronunciat que la resta d'anys. Les condicions climàtiques del 1999 i de l'any 2000 foren més seques. En tots dos casos es produí un curt període sec a finals de l'hivern i una sequera estival bastant acusada. La resta dels anys del seguiment (1997, 1998 i 2001), el període sec començà al març i es perllongà fins al setembre, malgrat ésser minorat per petites i esporàdiques pluges.

En resum, les condicions climàtiques anuals del període estudiat han estat força variades atenent a la durada i/o intensitat, i/o el moment de l'any en el que s'ha produït el període sec.

#### Taxes de creixement radial del pi blanc.

En la figura 7B s'ha representat l'evolució de les taxes de creixement en perímetre mitjanes de cada vessant (N i S) i la seva desviació estàndard ( $N_N=5$ ,  $N_S=5$ ). Les taxes de creixement radial del pi blanc, en ambdós vessants són sincròniques i homogènies. La majoria d'anys, el pi blanc té dos pics de creixement. El primer, i més elevat, es produeix a la primavera (maig), mentre que el segon té lloc a la tardor (octubre). No obstant, hi ha algunes desviacions d'aquest patró genèric, les quals estan relacionades amb les condicions específiques de cada any. Al 1997, en cap dels dos vessants els arbres presenten el pic de creixement de tardor, i al 1998 només els arbres del vessant N presenten el pic de primavera. D'altra banda, la figura també mostra que durant els períodes amb menys disponibilitat hídrica, les taxes de creixement dels arbres del vessant N són més altes que les del vessant S. Cal ressaltar que existeix una elevada variància en les taxes de creixement dins cada vessant, especialment entre els arbres amb pendent S.



**Figura 7.** A dalt, evolució de la temperatura mitjana i de la precipitació acumulada calculades per a cada interval de mostreig (entre 15 i 30 dies segons l'estació de l'any) a Begues (Garraf). A baix, taxes de creixement en perímetre del tronc (mitjana i desviació estàndard) dels arbres del vessant N (cercles blancs) i dels del vessant S (cercles negres).

| VESSANT NORD   |              |              |             |                    |                        |                         |                              |              |                |                    |
|----------------|--------------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|----------------|--------------------|
| Arbre          | Orient. (°)  | Pendent (°)  | Diam.(cm)   | Taxa Màx. (mm/dia) | H <sub>total</sub> (m) | H <sub>branca</sub> (m) | Vol. Capç. (m <sup>3</sup> ) | Roca (%)     | Alç. Veg. (cm) | Cob. arbustiva (%) |
| Ph-6           | 20           | 21           | 9.65        | 0.442              | 5.75                   | 0.74                    | 12.81                        | 0.00         | 122.94         | 10.16              |
| Ph-7           | 20           | 23           | 8.55        | 0.414              | 4.57                   | 0.37                    | 8.16                         | 12.25        | 79.25          | 5.47               |
| Ph-8           | 360          | 25           | 8.00        | 0.380              | 3.23                   | 0.35                    | 4.94                         | 43.75        | 73.61          | 5.47               |
| Ph-9           | 20           | 23           | 7.69        | 0.312              | 4.31                   | 0.67                    | 7.13                         | 31.25        | 148.13         | 10.94              |
| Ph-10          | 360          | 25           | 7.25        | 0.250              | 3.28                   | 0.57                    | 3.22                         | 50.00        | 72.50          | 7.81               |
| <b>Mitjana</b> | <b>12.00</b> | <b>23.40</b> | <b>8.23</b> | <b>0.36</b>        | <b>4.23</b>            | <b>0.54</b>             | <b>7.25</b>                  | <b>27.50</b> | <b>99.29</b>   | <b>7.97</b>        |
| <b>STD</b>     | <b>10.95</b> | <b>1.67</b>  | <b>0.93</b> | <b>0.08</b>        | <b>1.04</b>            | <b>0.18</b>             | <b>3.65</b>                  | <b>21.01</b> | <b>34.36</b>   | <b>2.56</b>        |

| VESSANT SUD    |               |              |             |                    |                        |                         |                              |              |                |                         |
|----------------|---------------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|----------------|-------------------------|
| Arbre          | Orient. (°)   | Pendent (°)  | Diam.(cm)   | Taxa Màx. (mm/dia) | H <sub>total</sub> (m) | H <sub>branca</sub> (m) | Vol. Capç. (m <sup>3</sup> ) | Roca (%)     | Alç. Veg. (cm) | Cobertura arbustiva (%) |
| Ph-1           | 220           | 23           | 9.47        | 0.398              | 5.11                   | 0.43                    | 15.70                        | 12.50        | 134.26         | 17.19                   |
| Ph-2           | 240           | 26           | 5.14        | 0.166              | 1.65                   | 0.02                    | 1.09                         | 93.75        | 20.00          | 0.78                    |
| Ph-3           | 240           | 24           | 6.18        | 0.281              | 2.97                   | 0.68                    | 1.93                         | 31.25        | 71.77          | 13.28                   |
| Ph-4           | 240           | 28           | 9.40        | 0.513              | 2.35                   | 0.33                    | 1.78                         | 50.00        | 50.00          | 7.03                    |
| Ph-5           | 230           | 29           | 8.06        | 0.429              | 2.71                   | 0.31                    | 3.03                         | 68.75        | 92.01          | 15.63                   |
| <b>Mitjana</b> | <b>234.00</b> | <b>26.00</b> | <b>7.65</b> | <b>0.36</b>        | <b>2.96</b>            | <b>0.35</b>             | <b>4.71</b>                  | <b>51.25</b> | <b>73.61</b>   | <b>10.78</b>            |
| <b>STD</b>     | <b>8.94</b>   | <b>2.55</b>  | <b>1.94</b> | <b>0.13</b>        | <b>1.30</b>            | <b>0.24</b>             | <b>6.19</b>                  | <b>31.68</b> | <b>43.16</b>   | <b>6.80</b>             |

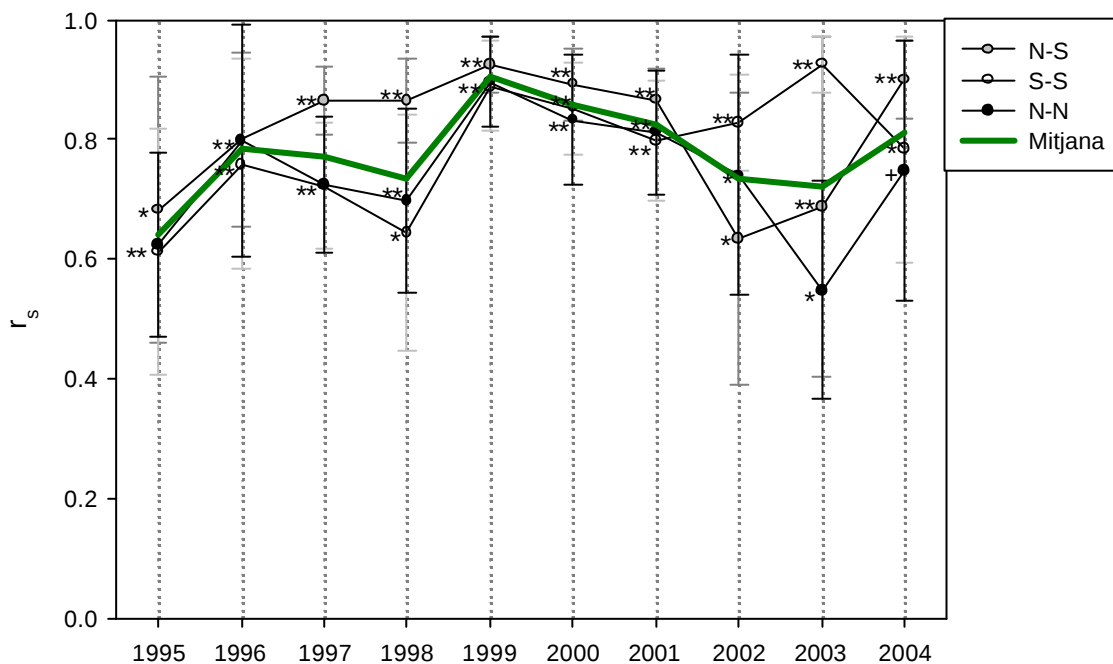
**Taula 1.** Característiques de l'entorn immediat i de les dimensions dels arbres a l'any 2002. Abreviacions: Orientació (Orient.); diàmetre a l'alçada del dendròmetre (Diam.); taxa màxima de creixement en perímetre (Taxa Màx.); alçada de l'arbre (H<sub>total</sub>); alçada de la primera branca viva (H<sub>branca</sub>); Volum de la capçada ( Vol. Capç.); percentatge d'aflorentament rocós (Roca); i alçada de la vegetació arbustiva (Alç. Veg.). Per més detalls, veure text.

### Variabilitat en les taxes de creixement individual.

Les característiques de cada arbre i del seu entorn més immediat (un cercle de 0,5m de radi al voltant del tronc) es mostren en la taula 1. El diàmetre i l'alçada dels arbres del vessant N és superior al dels del vessant S ( $8,23 \pm 0,93$  cm i  $7,65 \pm 1,94$  cm, respectivament en el cas del diàmetre; i  $4,23 \pm 1,04$  cm i  $2,96 \pm 1,30$  cm, respectivament en el cas de l'alçada). Cal destacar que malgrat aquestes diferències en la grandària dels arbres en cada vessant, les taxes de creixement radial màximes enregistrades són molt similars en tots dos casos ( $0,36 \pm 1,34$  cm pels arbres del N, i  $0,36 \pm 1,04$  cm pels del S).

Per aquest motiu s'ha contrastat l'homogeneïtat en les series de les taxes de creixement mitjançant un anàlisi de correlacions i de components principals (PCA).

Les series de les taxes de creixement en perímetre de tots els arbres mostren coeficients de correlació ( $r_s$ ) elevats i significatius ( $p > 0,01$  i  $N = 113$  observacions). Les correlacions entre els arbres del S ( $0,799 \pm 0,05$ ) són lleugerament més elevades que les que presenten els arbres del vessant N entre ells ( $0,785 \pm 0,08$ ), i les correlacions entre els arbres de diferent pendent són les més baixes de totes ( $0,754 \pm 0,07$ ). Tot i així, no s'han trobat diferències significatives en cap dels casos.

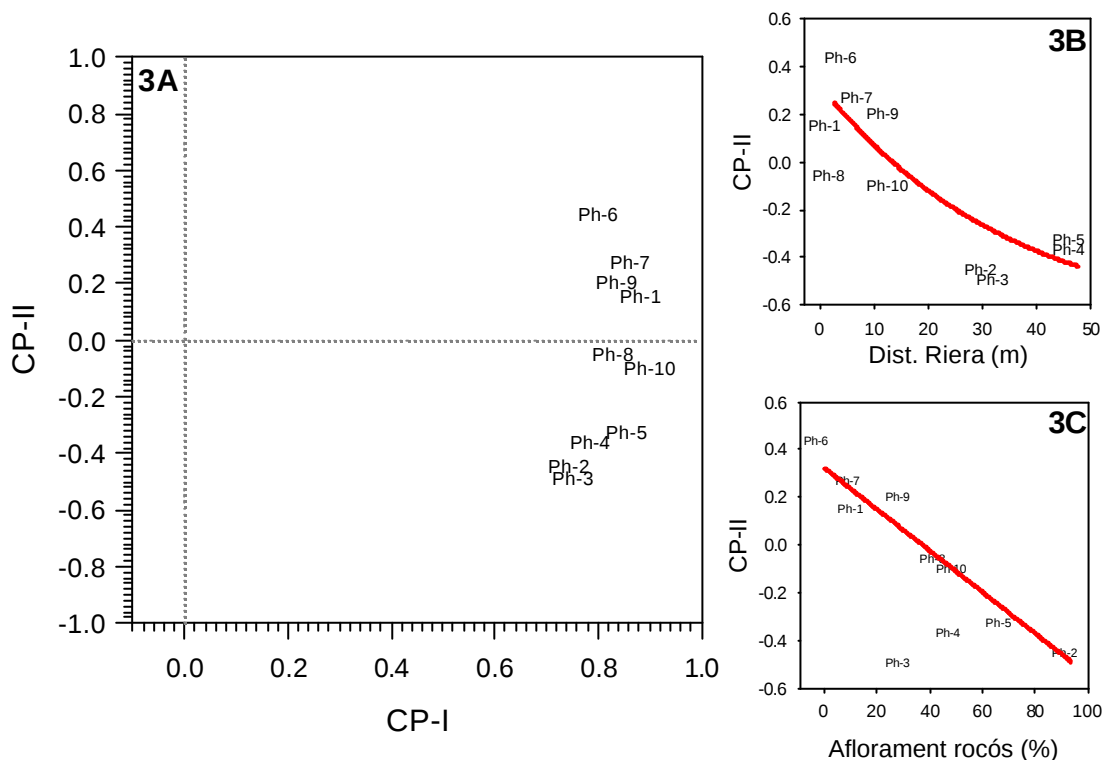


**Figura 8.** Evolució dels coeficients de correlació de Spearman anuals ( $r_s$ ) calculats entre les taxes de creixement radial de 5 arbres de l'obaga i les de 5 arbres de la solana. Els valors significatius s'indiquen amb: \*\* per  $p < 0,01$ ; \* per  $p < 0,05$ ; i + per  $p < 0,10$ .

L'anàlisi de correlacions realitzat any a any (Fig. 8) mostra que hi ha petites diferències en la sincronia de les taxes de creixement radial entre els diferents anys, de manera que en alguns casos (taxes dels arbres del N l'any 2004) la significació dels  $r_s$  passa a ser del 90%, enlloc del 95%. Les correlacions entre els arbres del vessant S per l'any 2003 mostren una elevada sincronia, mentre que els arbres del vessant N presenten els seus coeficients més baixos.

En el 1997, 1998 i 2002, els valors de  $r_s$  dins cada lloc han estat molt semblants, i en tots tres casos han estat més baixes que els  $r_s$  entre localitats. A més, les correlacions més baixes les trobem en els anys més secs (1995 i 2003), mentre que les  $r_s$  més elevades les troben en els anys en els que la distribució anual de les precipitacions ha estat molt més equitativa (1999 i 2000).

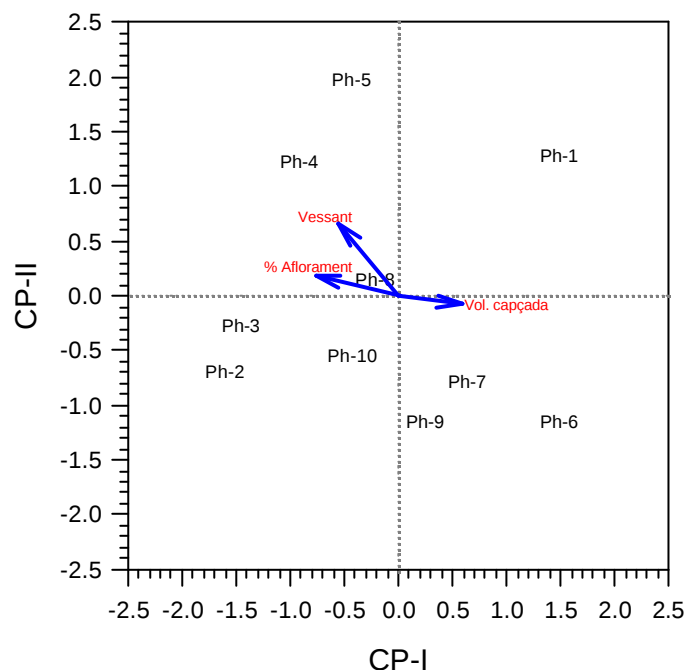
El diagrama d'ordenació obtingut en el PCA, basat en les taxes de creixement dels 10 arbres per tot el període (N=113) es mostra en la figura 9.



**Figura 9.** **9A** Diagrama d'ordenació basat en un PCA (Anàlisi de Components Principals) en el que la situació dels 10 arbres correspon a la covariància entre les seves taxes de creixement radial. Les fletxes no s'han representat per a obtenir major claredat. **9B.** Relació entre els valors de cada arbre pel CP-II obtinguts en el PCA i la distància de cada arbre a la riera que separa els dos vessants (N i S). **9C.** Relació entre els valors de cada arbre pel CP-II obtinguts en el PCA i el percentatge d'aflorament rocós al voltant del tronc (en una àrea de 0,5m de radi).

El primer component (CP-I), explica el 73,8% de la variabilitat existent en les series de creixement de tots els arbres. El segon (CP-II) i tercer components expliquen, respectivament, el 9,6% i el 3,7%. Tots els arbres presenten correlacions positives amb el CP-I (únic component significatiu), de manera que interpretem que aquest eix descriu la variabilitat en comú (sincronia) en les taxes de creixement radial de tots els arbres. El CP-II divideix els arbres en dos grups, gairebé tots els arbres del vessant S presenten valors negatius per aquest eix, mentre que la majoria dels arbres del vessant N presenten valors positius respecte el CP-II. Els arbres queden representats en aquest eix segons les condicions ambientals de seu entorn immediat, tal i com mostren les figures 9B i 9C. En la figura 9B es posa de manifest que existeix una relació exponencial negativa entre els valors de cada arbre respecte el CP-II i la distància de cada arbre a la riera que separa ambdós vessants ( $r^2=0,82$ ,  $N=10$ ,  $p>0,02$ ). Alhora, la relació entre els valors de cada arbre amb el CP-II i el percentatge d'aflorament de roca mare (en un radi de 0,5m al voltant de l'arbre) és lineal ( $r^2=0,85$ ,  $N=10$ ,  $p>0,002$ ).

Aquests resultats s'han corroborat amb un anàlisi de redundàncies (RDA), en el que de totes les variables que descriuen l'entorn immediat de l'arbre (Taula 1), només el vessant en el que es troben els arbres, el percentatge d'aflorament rocós i la grandària de la capçada dels arbres expliquen de forma significativa la variabilitat existent en les taxes de creixement en perímetre (figura 10).



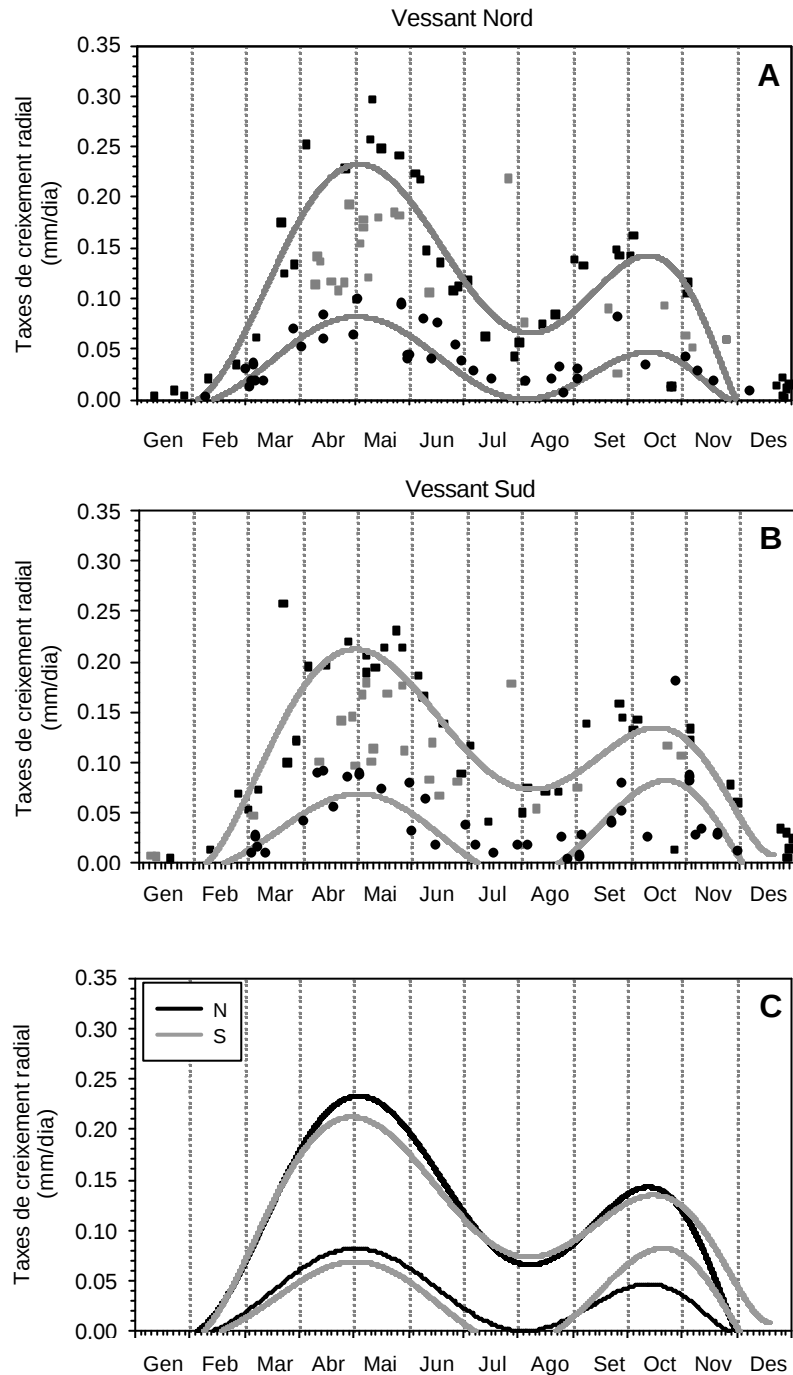
**Figura 10.** Diagrama d'ordenació basat en un RDA (Anàlisi de Redundàncies) calculat pel període 1995-2004 en el que es mostra la situació dels 5 arbres de la solana (del Ph-1 al Ph-5) i els 5 de l'obaga (del Ph-6 al Ph-10), i la posició de les variables ambientals que descriuen de forma significativa ( $p=0,05$ ) la variabilitat en les taxes de creixement en perímetre.

## Període i patró de creixement radial.

L'activitat del càmbium del pi blanc ha començat en tots els anys al febrer i ha finalitzat al desembre. D'altra banda, el patró de creixement és bimodal donat que té dos màxims de creixement separats per una disminució acusada de les taxes de creixement. El primer màxim de creixement, el qual és també el més elevat, té lloc al mes de maig, i el segon màxim esdevé a l'octubre. Tot i així, hi ha una elevada variabilitat en les taxes de creixement de cada any que es correspon amb la distribució de les precipitacions al llarg de l'any (Fig. 7).

Per a caracteritzar el patró de creixement del tronc, s'han representat les taxes de creixement enregistrades durant els darrers 10 anys (des de l'abril del 1995 fins al juliol del 2004) com si s'haguessin donat en un mateix any. Després, s'han ajustat funcions polinòmiques de grau 6 als valors de les taxes màximes de creixement per una banda, i per l'altre als valors de les taxes mínimes. D'aquesta manera, les funcions ajustades descriuen el patró de creixement del pi blanc a la localitat estudiada quan les condicions climàtiques han estat òptimes (ajust als valors màxims), i quan aquestes han estat adverses (ajust als valors mínims). Aquest anàlisi s'ha realitzat per cada vessant per separat per poder contrastar si existeixen diferències en el patró i en el període de creixement del tronc entre localitats. Els resultats obtinguts es presenten en la figura 11A (vessant N) i en la figura 11B (vessant S). La figura 11C mostra les funcions ajustades en cada vessant, per a facilitar-ne la comparació.

Al vessant N, l'activitat del càmbium del pi blanc comença a principis o mitjans de febrer, segons les condicions climàtiques (Fig. 11A, veure també Fig. 7). Les taxes de creixement radial augmenten ràpidament, fins assolir el primer màxim durant la primera setmana de maig. Aquesta taxa màxima és de 0,23 mm/dia quan les condicions climàtiques són favorables pel creixement i de 0,08 mm/dia quan són desfavorables. Després, les taxes de creixement en perímetre disminueixen fins assolir el mínim durant la primera setmana d'agost (0,07 mm/dia quan les condicions són favorables, i 0,01 mm/dia quan són desfavorables). El segon màxim de creixement s'assoleix a mitjans d'octubre (0,14 mm/dia sota condicions favorables i 0,05 mm/dia quan són desfavorables). Finalment, el creixement radial s'atura a finals de novembre o principis de desembre segons les condicions ambientals. El patró de creixement obtingut pel vessant S és molt semblant al descrit pel vessant N. Tot i així, existeixen algunes diferències tant en la durada del període de creixement com en les taxes de creixement màximes i mínimes que s'assoleixen. El màxim de creixement de primavera coincideix en el temps, però les taxes màximes són una mica més baixes en el vessant S (0,21 mm/dia i 0,07 mm/dia segons les condicions siguin favorables o no). Les taxes mínimes també són simultànies en ambdós vessants (a principis d'agost), però en el vessant S aquestes taxes són més baixes (0,07 mm/dia quan les condicions són bones), especialment quan les condicions no afavoreixen el creixement del pi blanc.



**Figura 11.** Taxes de creixement radial enregistrades al llarg dels darrers 10 anys (N=113) i patró de creixement ajustat a les taxes de creixement màximes (creixement sota condicions climàtiques favorables) i a les taxes mínimes (condicions de creixement desfavorables), pels arbres del vessant N (11A), i pels del sud (11B). La figura 11C mostra les funcions ajustades a cada vessant per a facilitar-ne la comparació.

La diferència més notable en el patró de creixement entre vessants, és que el creixement del tronc en els pins de la solana s'atura des de principis de juliol fins a mitjans

d'agost quan les condicions hídriques són estressants, per exemple en els anys 1995, 2001 i 2003 (Fig. 7). Les taxes màximes de tardor en els pins de la solana també són més baixes que en els de l'obaga (0,14 mm/dia), i també són bastant sincròniques. Aquestes diferències són més evidents quan les condicions hídriques limiten el creixement (0,08 mm/dia a la solana i 0,05 mm/dia a l'obaga), i en terme mig estan endarrerides una setmana respecte les dels pins del vessant N. Finalment, l'activitat del càmbium acaba simultàniament a les dues localitats quan les condicions són desfavorables, però en cas contrari, el període de creixement als arbres de la solana s'allarga fins a tres setmanes més que en els altres, acabant el període de creixement a mitjans o finals de desembre.

### Control del clima sobre les taxes de creixement radial.

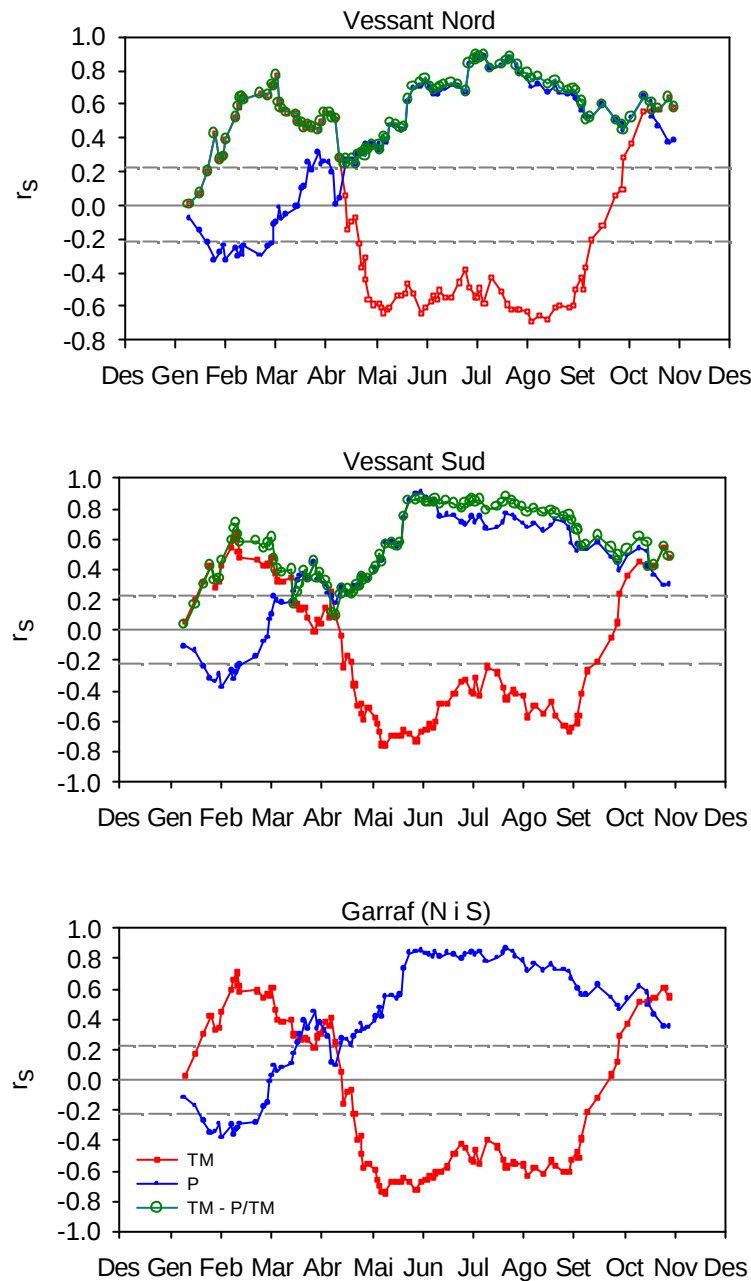
La figura 5 representa l'evolució del coeficient de correlació de Spearman ( $r_s$ ) entre les taxes mitjanes de creixement del tronc en cada vessant, i les variables climàtiques pel conjunt del període estudiat. La figura mostra com la precipitació (P) la temperatura mitjana (TM) alternen la seva influència sobre el creixement radial del pi blanc. Al principi i al final del període de creixement, les TM es relacionen positivament i de forma significativa amb les taxes de creixement; mentre que durant el període sec el seu efecte passa a ser negatiu (relació també significativa). Durant aquest temps, les precipitacions tenen simultàniament una relació positiva significativa amb les taxes de creixement.

Al vessant N, les TM són el factor climàtic que més afecta (relació positiva i significativa) el creixement al principi del període de creixement (des del febrer fins a finals d'abril). Des de finals d'abril fins a mitjans de maig, la variable amb més efecte sobre el creixement és la P (relació positiva i significativa). Des de mitjans de maig fins a principis d'octubre, ambdues variables (P i TM) afecten el creixement radial significativament, TM té un efecte negatiu i P el té positiu. Així doncs, l'índex d'aridesa P/TM és el factor que més influencia el creixement radial del pi blanc en ambdues vessants ( $p=0,01$ ) durant aquests mesos. Finalment, des de principis d'octubre fins a finals d'any, quan el pi blanc acaba el període de creixement, les TM tornen a tenir efecte positiu i significatiu, sent la temperatura mitjana la variable climàtica que més afecta el creixement. Tot i així, en aquest període de l'any les precipitacions mantenen la seva relació positiva amb les taxes de creixement.

Hi ha dues diferències entre les relacions creixement radial – clima establertes en cada vessant: (i) en els arbres del vessant S la relació positiva entre les P i les taxes de creixement comença abans que els arbres de l'obaga (comença a mitjans d'abril); (ii) des del juny fins l'agost, l'efecte de les TM va disminuint progressivament en ambdós llocs, però només a la solana aquesta relació passa a ser no significativa durant la segona meitat d'agost.

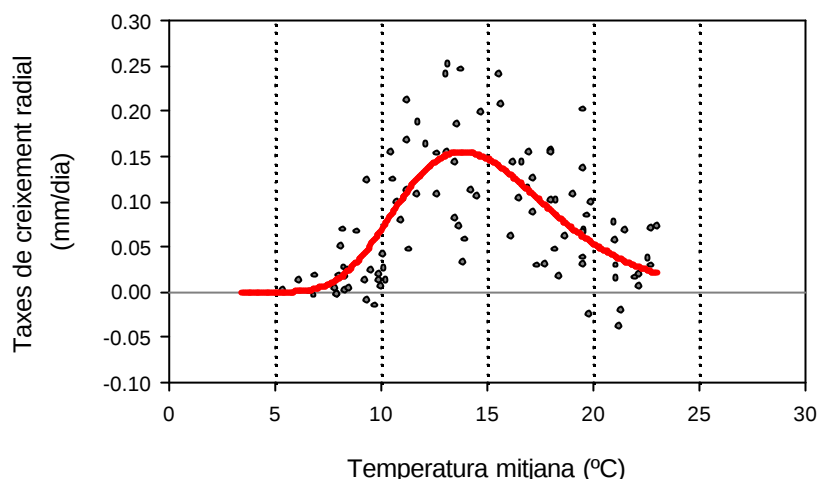
Aquests resultats han estat contrastats mitjançant la construcció d'una nova variable climàtica que combina l'alternança temporal de P, P/TM i TM tal i com s'ha descrit en el paràgraf anterior, i l'establiment de correlacions entre la nova variable i les taxes de creixement per tot el període d'anàlisi (Fig. 12). El  $r_s$  mitjà és de 0,247 amb els arbres de

l'obaga, i de 0,313 amb els de la solana (en tots dos casos  $p < 0,01$ ,  $N=117$ ). Cap de Les anteriors variables climàtiques (TM, P i P/TM) tenia un  $r_s$  mitja anual significatiu al 99%.



**Figura 12.** Evolució del coeficient de correlació de Spearman ( $r_s$ ) de la precipitació acumulada (P), temperatura mitjana (TM) i la combinació TM-P/TM de les dues (per més detalls, veure text) i la mitjana de les taxes de creixement radial enregistrades al llarg dels darrers 10 anys ( $N=113$ ) en el vessant Nord (a dalt), en el Sud (al mig) i la mitjana dels dos vessants (a baix).

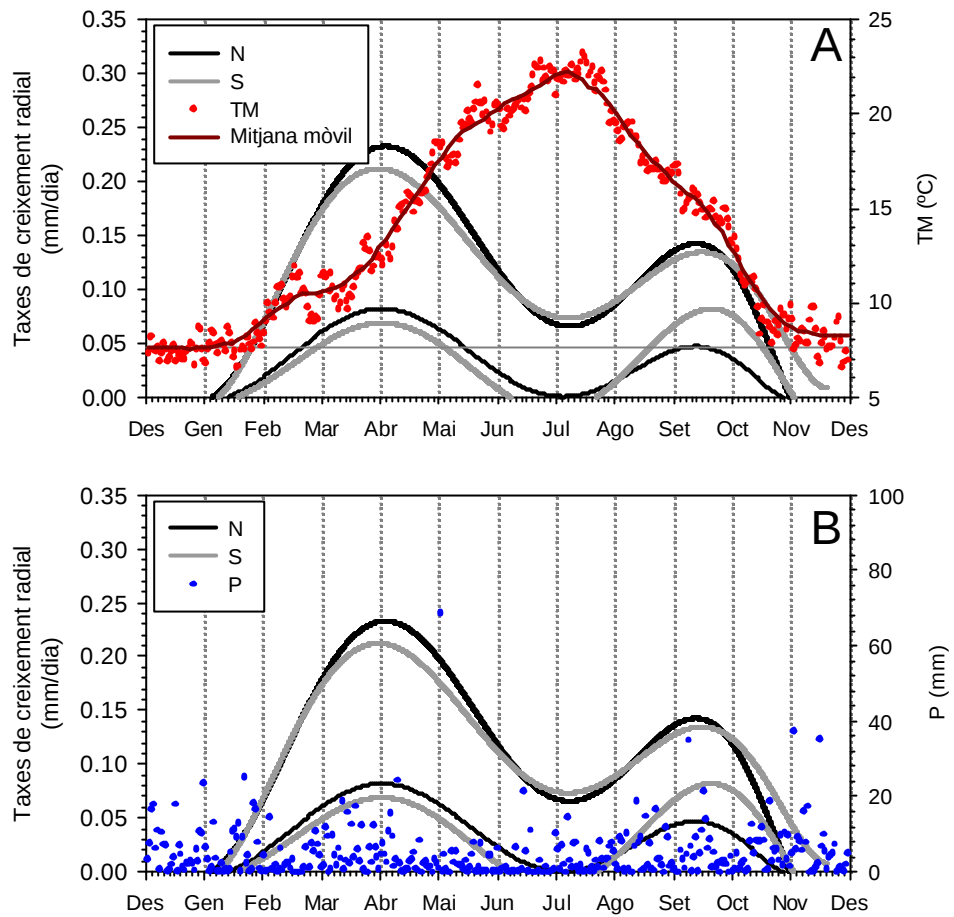
La figura 13 mostra la relació entre la TM i les taxes de creixement en perímetre mitjanes dels 10 arbres estudiats (N i S). La funció que descriu la relació entre ambdues variables és la Log-Normal de tres paràmetres ( $p < 0,0001$ ). Els paràmetres d'aquesta funció indiquen que hi ha un llindar de TM ( $TM = 7,65^{\circ} \text{C}$ ) a partir del qual pot començar l'activitat del cànium, i per tant, el creixement en gruix del tronc. Un cop superat aquest valor límit, les taxes de creixement radial augmenten al augmentar la temperatura, fins al màxim de 0,155 mm/dia quan la TM és de  $19,79^{\circ} \text{C}$ . A partir d'aquest valor de TM, al augmentar els valors de TM superiors, les taxes de creixement disminueixen gradualment.



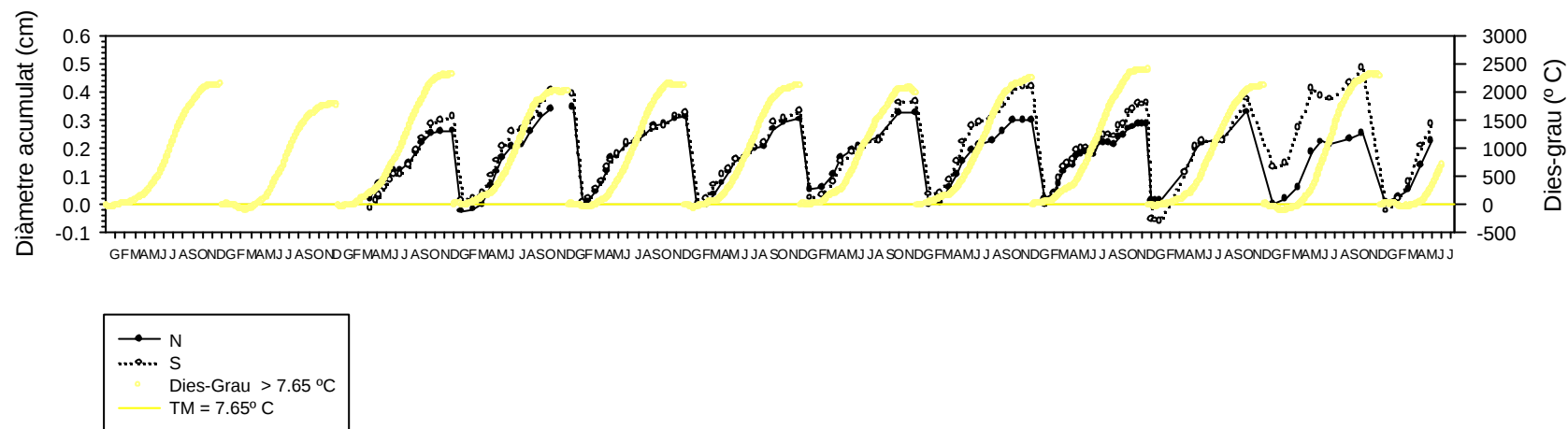
**Figura 13.** Relació entre la temperatura mitjana i les taxes de creixement en perímetre del pi blanc al Garraf (N=10 arbres, 5 del vessant N i 5 del S,  $p < 0,0001$ ).

L'existència del llindar tèrmic de  $7,65^{\circ} \text{C}$  pot veure's també a la figura 14A, on s'hi ha representat les taxes de creixement en perímetre de cada lloc, de la mateixa manera que en la figura 11C, i s'hi ha superposat les TM diàries mitjanes pel període estudiat. La figura mostra con el creixement radial del pi blanc ha començat en terme mig quan les TM han superat els  $7,65^{\circ} \text{C}$ . No obstant, en els resultats obtinguts no queda clar quan s'atura el creixement. El mateix tipus de figura s'ha obtingut amb la variable P/TM (Fig. 14B). Aquesta figura mostra l'elevada sincronia entre P/TM i les taxes de creixement quan les condicions climàtiques són adverses durant tot l'any, excepte a l'hivern, quan el creixement del pi blanc està latent.

La figura 15 mostra el diàmetre mitjà acumulat per cada localitat (N i S) i els dies-grau acumulats per sobre dels  $7,65^{\circ} \text{C}$  de TM al llarg de tot el període del seguiment. La figura mostra que en cadascun dels anys del seguiment el creixement radial ha començat quan les TM han començat a estar per sobre dels  $7,65^{\circ} \text{C}$ , excepte a l'any 2003, que el creixement va començar abans. D'altra banda, la figura mostra que el increment en diàmetre anual mitjà del pi blanc a la zona estudiada és de 0,8 cm en ambdós vessants. Tot i així, els arbres del vessant S acostumen a tenir increments en diàmetre superiors als dels arbres de l'obaga, sobretot en l'any 2003 (l'any amb major disponibilitat hídrica durant tot l'any).



**Figura 14.** Relació entre el patró de creixement radial de cada vessant (N i S) i les variables climàtiques, on TM és la temperatura mitjana diària i P és la precipitació diària.



**Figura 15.** Evolució del diàmetre mitjà acumulat dels arbres del vessant nord (N) i dels arbres del vessant sud (S), i sumatori dels dies –grau per sobre del llindar de 7,65° C al llarg del seguiment dendroecològic del pi blanc al Garraf (des de l’abril del 1995 al juliol del 2004). Els dies-grau són el sumatori dels graus en els que la temperatura mitjana diària supera un llindar prèviament determinat (per a més detalls, veure text).

### Sèries de creixement radial: cronologies.

S'han establert dues cronologies provisionals per la zona d'estudi a partir de totes les mostres extretes; una pels arbres situats dins la massa forestal, i una altra formada pels arbres que creixen de forma isolada. Posteriorment, s'ha optimitzat el període que avarca cada cronologia i els valors dels seus paràmetres de control de qualitat de la mateixa mitjançant la selecció dels períodes de temps de cada mostra (o testimoni de fusta) i la eliminació d'algunes mostres. El criteri d'eliminació s'ha basat en els valors del coeficients de correlació que cada mostra té amb la resta per períodes de 40 anys amb un desplaçament de 20 anys. Els fragments i/o sèries eliminades presentaven en tots els casos correlacions baixes malgrat que la seva datació era correcta. Finalment, s'ha obtingut una tercera cronologia formada per tot el conjunt de mostres. La taula 2 mostra les característiques i paràmetres estadístics de cada cronologia, juntament amb els valors mitjans obtinguts en una xarxa de 28 cronologies distribuïdes al llarg de l'àrea de distribució de l'espècie a la Península Ibèrica i a les Illes Balears.

Els resultats obtinguts mostren que els arbres més vells no són els de la massa forestal, sinó els que creixen de forma aïllada sobre les roques. Aquest resultat no ha d'estranyar donat que la massa forestal es troba enmig d'antics bancals abandonats, fet que és molt habitual en els boscos de pi blanc del nostre territori. L'arbre més vell datat dins del bosc té gairebé 70 anys (període màxim a la taula 2), donat que les mostres extretes a 1,30 m d'alçada del tronc indiquen que el primer anell correspon al any 1945. Per datar amb exactitud l'edat d'un arbre és necessari obtenir un testimoni de fusta a la base del arbre (al coll de l'arrel), i que aquesta mostra contingui la medul·la o centre de l'arbre. En aquest cas, les mostres han estat extretes a 1,30 m d'alçada per tal d'evitar anomalies en el gruix dels anells de creixement o deformacions causades per pedres i/o possibles ferides; per aquest motiu, la datació dels arbres infraestima la seva edat, en com a mínim 10 anys. Aquest resultat indica que molt possiblement els conreus que hi havia en aquesta zona van ser abandonats durant la guerra. En canvi, les mostres dels arbres que creixen sobre les roques a dalt de tot de la muntanya daten de finals de la dècada del 1920, xifra que sumant-li la correcció de 10 anys, indica que molt possiblement aquests arbres tinguin com a mínim 90 anys.

Totes les correlacions entre arbres i entre *cores* d'una mateixa cronologia són elevades i significatives (taula 2), sent, com és habitual més elevades entre les mostres del mateix arbre que entre arbres. Aquest resultat indica que existeix un clar patró comú a tots els individus. La correlació entre mostres d'un mateix arbre és més elevada en els arbres de dins el bosc, aquest resultat és lògic tenint en compte que les condicions de l'entorn immediat (especialment el pendent). Es ben conegut que les coníferes fan anells de creixement més amples i amb fusta de reacció a la part del tronc que mira cap al pendent per a mantenir-se verticals i per a corregir l'efecte de petites esllavissades i moviments del terreny. Per aquest motiu, donat que els arbres que creixen en les roques, tenen un pendent més elevat que els que creixen sobre antics bancals; és lògic que la correlació de les diferents mostres d'un mateix arbre sigui més baixa en els arbres que creixen isolats entre les roques.

fan que els arbres que creixen despenjats entre les s'ha comentat abans, sobre bancals i per tant es pot considerar que el pendent és pràcticament. D'altra banda, les correlacions entre les series mitjanes de creixement radial dels diferents arbres són més elevades en els arbres isolats. Aquest resultat s'explica pel fet que dins una massa forestal, la pròpia dinàmica de poblacions crea situacions de competència entre individus que fa que el creixement dels diferents arbres pugui ser substancialment diferent, mentre que tots els arbres isolats creixen sota unes condicions de substrat, pendent i exposició als factors climàtics (per exemple al vent) molt similars i sense estar sotmesos a la dinàmica de la successió.

|                                             | <b>GARRAF</b> | <b>Massa forestal</b> | <b>Arbres isolats</b> | <b>Mitjana boscos pi blanc</b> |
|---------------------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Codi                                        | E0GAR         | GAR_b                 | GAR_i                 | E0                             |
| Nº arbres                                   | 22            | 14                    | 8                     | 15                             |
| Nº <i>cores</i>                             | 43            | 27                    | 16                    | 30                             |
| Període màxim                               | 1928-2003     | 1945-1999             | 1928-2003             | ---                            |
| Període comú                                | 1963-1999     | 1968-1999             | 1948-2002             | ---                            |
| Període EPS (85%)                           | 1938-2003     | 1953-1999             | 1935-2003             | ---                            |
| Correlació dins arbres                      | 0,734         | 0,713                 | 0,752                 | ---                            |
| Correlació entre arbres                     | 0,522         | 0,578                 | 0,566                 | ---                            |
| % VAR (CP-I)                                | 55,08         | 60,77                 | 62,42                 | 59,167                         |
| Sensibilitat mitjana                        | 0,283         | 0,260                 | 0,335                 | 0,309                          |
| Autocorrelació<br>(sèries estandarditzades) |               |                       |                       |                                |
| 1 <sup>er</sup> ordre                       | -0,162        | -0,064                | -0,093                | ---                            |
| 2 <sup>o</sup> ordre                        | -0,082        | 0,0311                | -0,1286               | ---                            |
| SNR                                         | 20,721        | 19,152                | 10,432                | 17,550                         |

**Taula 2.** Característiques de la cronologia establerta al P. N. del Garraf y d'un conjunt de 28 cronologies de boscos de pi blanc distribuïts al llarg de l'est peninsular i les Illes Balears. El període màxim fa referència al interval de temps cobert pel número de *cores* i d'arbres que es detallen. El període comú és l'interval de temps màxim que cobreix el nombre màxim de mostres. Veure text , per més detalls.

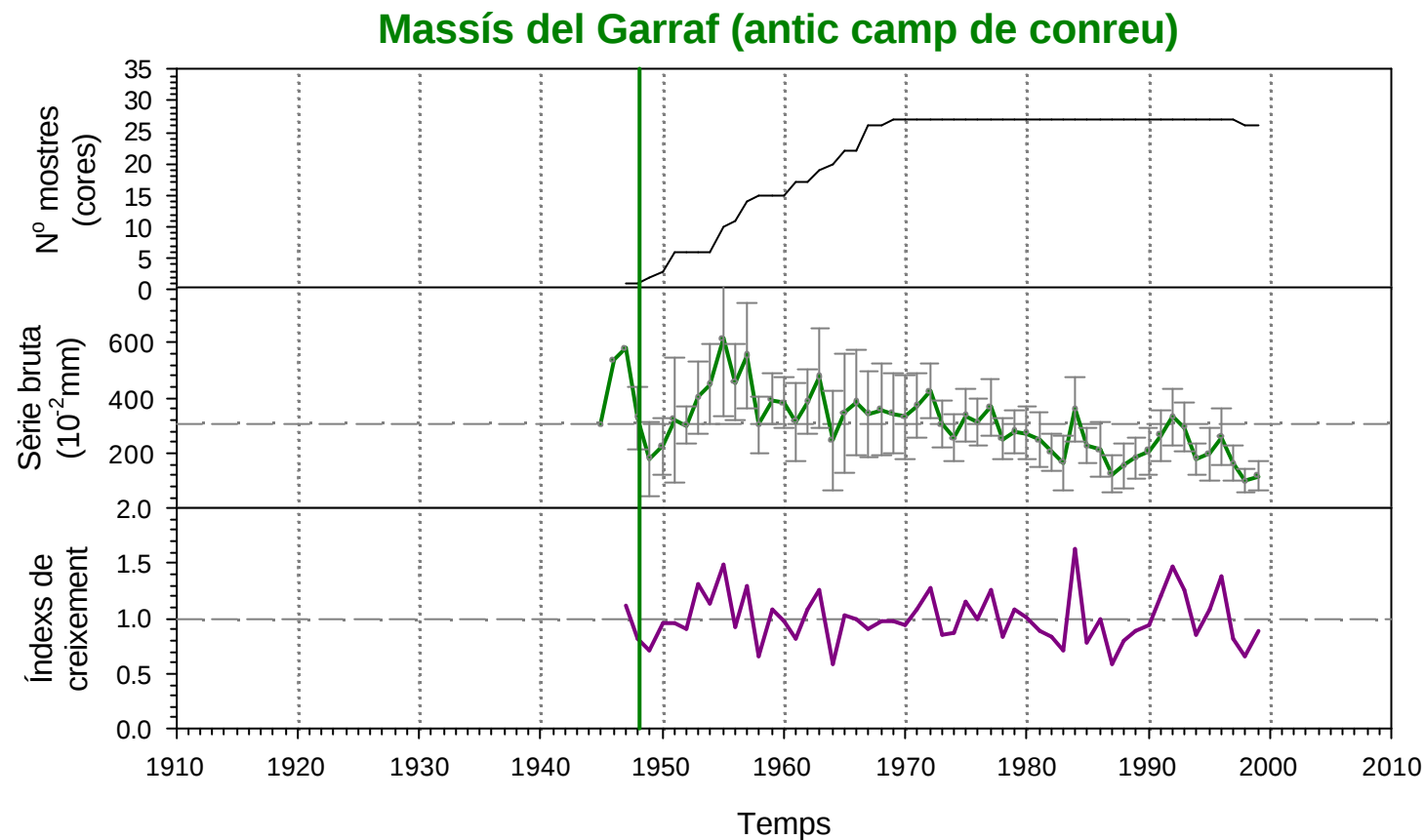
La bona correlació entre les sèries del gruix dels anells de creixement dels dos grups d'arbres (de dins del bosc i amb creixement isolat) indica que es poden agrupar per a obtenir una sola cronologia que sigui representativa de la zona (E0GAR).

El EPS és un estadístic el valor del qual depèn de dos factors: del número d'arbres que formen la cronologia, i de les correlacions entre ells. D'aquesta manera, el EPS assoleix valors entre 0 i 1, sent més elevat quants més arbres formen la cronologia i quant més elevades siguin les correlacions entre ells. Es considera que a partir de valors superiors a 0,85 la cronologia representa una porció suficient de la variabilitat comú de la població estudiada. El valor de EPS de la cronologia obtinguda pel Garraf supera aquest llindar pel període 1938-2003, la qual cosa garanteix la fiabilitat i robustesa estadística de la cronologia per aquest interval de temps, o dit d'una altra manera que el nombre de mostres i arbres que han intervingut en la construcció de la cronologia és suficient per representar la població real.

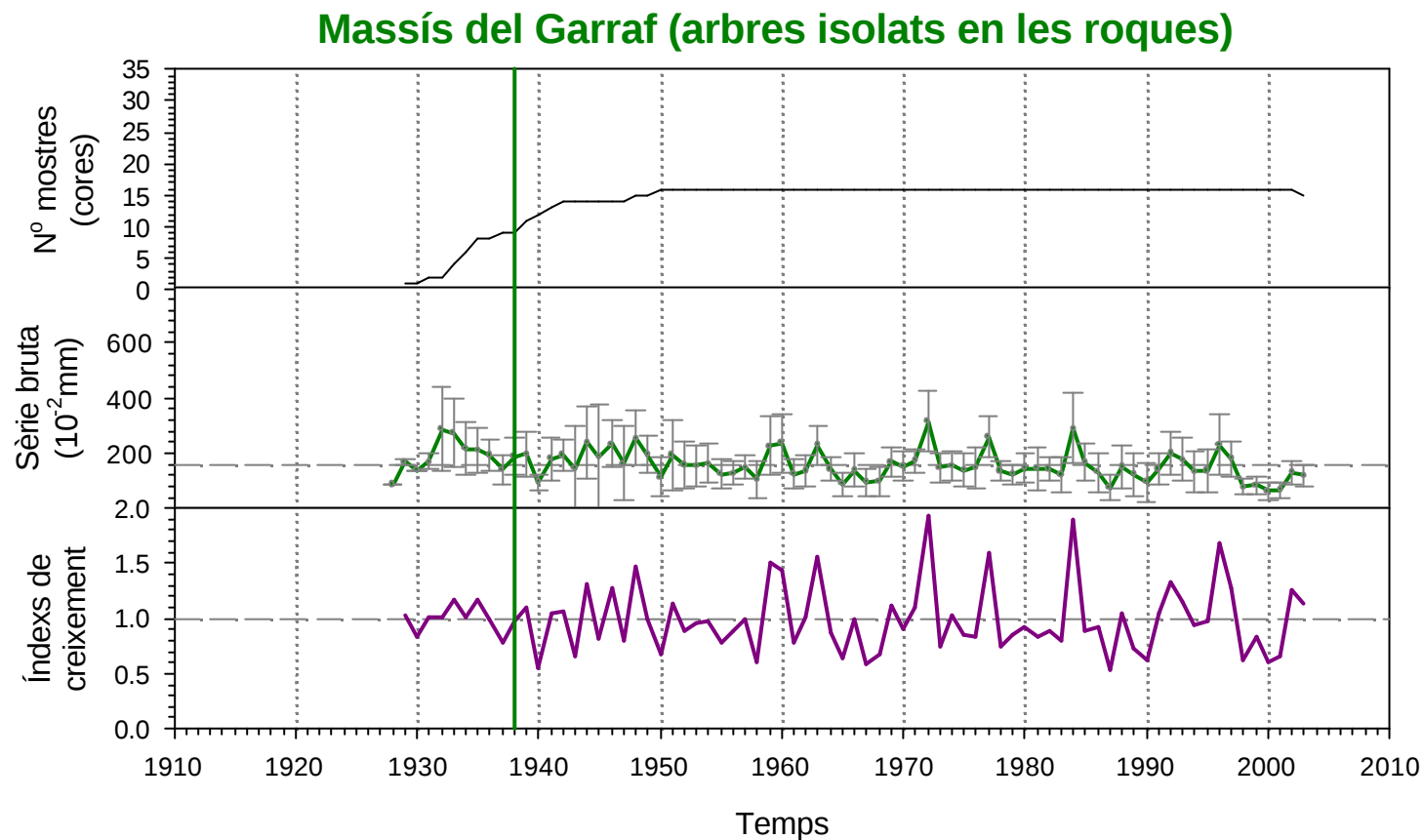
El percentatge de variància explicada pel primer component en l'anàlisi de components principals (% VAR PC-I) descriu la proporció de variabilitat en el creixement que tenen en comú de les diferents mostres d'una cronologia. Tant en la cronologia establerta dins el bosc, com en la formada per arbres isolats aquest percentatge és molt elevat (superior al 60%), en canvi en la cronologia general del Garraf, aquesta disminueix una mica degut a que al ajuntar arbres amb unes condicions ambientals diferents, les causes que creen variabilitat en el creixement també es diversifiquen (tot i així supera el 50%), fet que fa pensar que les condicions climàtiques (causa de variabilitat que comparteixen ambdós grups d'arbres) regulen fortament el creixement del pi blanc.

La sensibilitat és una mesura de canvi que expressa la diferència entre dos valors successius d'una sèrie (anys). La sensibilitat mitja (MSx) és el valor mig dels valors absoluts de les sensibilitats calculades per cada parella d'anys. D'aquesta manera, aquest índex expressa quina part del creixement dels arbres d'una localitat es troba influenciat pels factors ambientals. El grau de variació interanual o sensibilitat (MSx) és bastant elevat, indicant que existeix una gran variabilitat en el creixement entre anys. Aquest índex s'utilitza com a indicador de la sensibilitat dels arbres a la variabilitat climàtica de la zona. Per tant, és lògic que els arbres isolats que creixen en les esquerdes dels afloraments de roca calcària estiguin més afectats per les condicions climàtiques, especialment la disponibilitat hídrica, que no pas els que creixen sobre antics bancals on el sòl és profund.

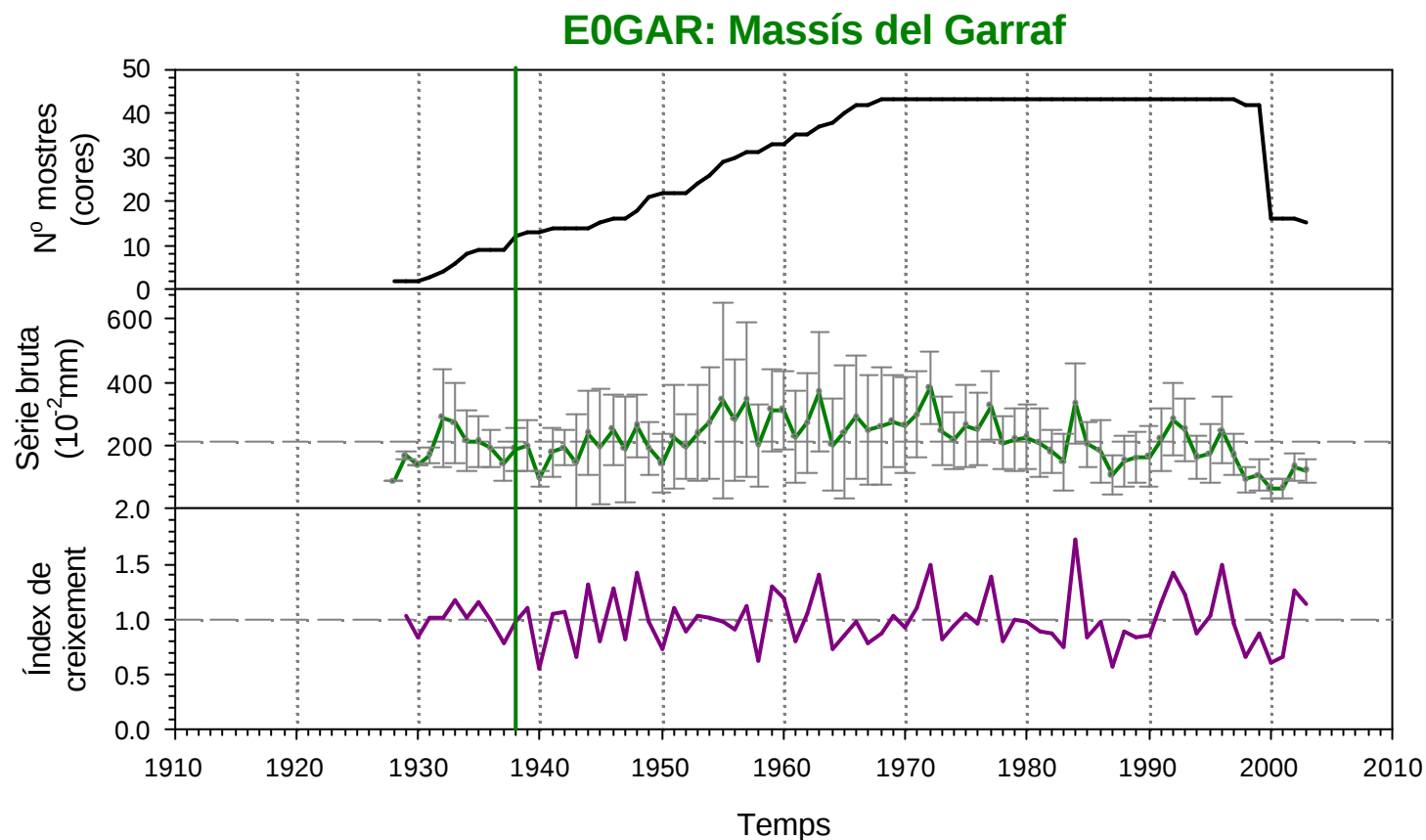
El mateix resultat s'obté amb la relació senyal/soroll, SNR (de l'anglès *Signal-Noise Ratio*), que és un estadístic indicatiu del percentatge de creixement que pot atribuir-se directament a les condicions ambientals, respecte del que no ho és. La cronologia obtinguda presenta un SNR normal si ho comparem amb la resta de cronologies de l'est Peninsular (taula 1). Els estadístics referents a l'autocorrelació de les sèries indiquen que, en tots tres casos, el tractament estadístic de la estandardització ha filtrat correctament la dependència del creixement d'un any respecte el any anterior, de manera que la cronologia obtinguda es adequada tant per a l'establiment de les relacions creixement - clima, com per a la reconstrucció de la història del bosc.



**Figura 16.** Cronologia establerta per el gruix dels anells de creixement al Garraf amb els arbres de la massa forestal que creix sobre antics camps de conreu abandonats. A dalt, nombre de mostres (*cores*) que intervenen en la cronologia (en total 14 arbres, 27 *cores*); al mig, sèrie mitja i desviació estàndard del gruix dels anells de creixement; i a baix, sèries dels índexs de creixement (cronologia). La línia vertical indica el límit de la fiabilitat de la cronologia segons el EPS (veure text).



**Figura 17.** Cronologia establerta per el gruix dels anells de creixement al Garraf amb arbres que creixen en les esquerdes dels afloraments de roca calcàrea i de forma isolada al Garraf. A dalt, nombre de mostres (*cores*) que intervenen en la cronologia (en total 8 arbres, 16 *cores*); al mig, sèrie mitja i desviació estàndard del gruix dels anells de creixement; i a baix, sèries dels índexs de creixement (cronologia). La línia vertical indica el límit de la fiabilitat de la cronologia segons el EPS (veure text).



**Figura 18.** Cronologia establerta pel gruix dels anells de creixement al P.N. del Garraf. A dalt, número de mostres (*cores*) que hi intervenen; enmig, mitjana i desviació estàndard anual del gruix dels anells; i a baix, índexs de creixement anuals (sèrie estandarditzada). La línia vertical indica l'any a partir del qual les sèries son, estadísticament, representatives de la població estudiada (veure text).

En resum, els estadístics de la cronologia del Garraf indiquen que es tracta d'un bosc amb elevada sensibilitat a les condicions ambientals, amb una forta homogeneïtat entre el creixement dels diferents arbres, i el creixement dels quals està clarament afectat per les condicions climàtiques de cada any.

Les figures 16, 17 i 18 mostren les sèries bruta del gruix dels anells de creixement i les sèries estandarditzada o índexs de creixement per a cada cronologia establerta.

### Reconstrucció de la història del bosc.

Entenem com a tendència tota aquella desviació sostinguda respecte el creixement mig del període estudiat. Per posar de manifest canvis en el creixement dels arbres, en primer lloc s'ha realitzat un anàlisi de les sèries mitjanes de creixement brut (taxes de creixement anual). D'aquesta manera podem destacar l'existència de períodes de temps amb major o menor creixement i amb major o menor variància. Es pot inferir en quina fase de la successió es troba un bosc segons aquests dos paràmetres. Per exemple, en la fase de iniciació o colonització les taxes de creixement acostumen a ser elevades donat que no existeix massa competència entre arbres i la variabilitat (desviació estàndard) sol ser alta degut a que les condicions de l'entorn immediat de cada arbre condicionen força el seu creixement. En canvi, en la fase d'autotala, tant el creixement mig com la variabilitat són molt baixes, ja que la competència entre arbres limita el seu creixement i la pròpia estructura del bosc tancat homogeneïtza les condicions ambientals que afecten el desenvolupament dels individus (Ribas, 1999; Bosch & Gutiérrez, 1999). La limitació d'aquest tipus d'anàlisi radica en el fet que aquestes sèries de creixement brut presenten moltes oscil·lacions que són degudes a l'edat i mida dels arbres, al clima i/o a la dinàmica i estructura del bosc; i algunes vegades no és possible distingir amb suficient claredat la causa de les esmentades oscil·lacions. Per aquest motiu, i per a contrastar els resultats s'han comparat les taxes de creixement radial anual entre els arbres del bosc amb els que creixen isolats.

Les sèries brutes de creixement radial i la seva variabilitat es mostren a la figura 16 pels arbres de la massa forestal. I en la figura 17 pels que creixen isolats. S'observa que els arbres isolats no presenten canvis evidents en el valor mitjà de creixement. D'altra banda, la variabilitat en les taxes de creixement radial anuals s'ha mantingut bastant constant al llarg dels darrers 70 anys, si bé, aquesta ha estat menor en la darrera dècada i a finals dels anys 50 i del anys 60.

En les sèries de creixement brut dels arbres del bosc es poden distingir dues etapes en la història recent del bosc. Un primer període (1948-1973) en el que les taxes de creixement i la seva variabilitat són més elevades que en la resta, i el segon període, des de 1974 fins a 1999, es caracteritza per una disminució gradual de les taxes de creixement i de la seva variabilitat. El primer període es correspon amb la fase d'iniciació de bosc, mentre que el segon període és en el que té lloc el tancament gradual de la volta de les capçades, fins a l'estat actual en el que el bosc encara no ha entrat en fase d'autotala degut a la seva heterogeneïtat horitzontal (clarianes). No s'observen en les taxes de creixement canvis sobtats que puguin atribuir-se a

pertorbacions (tales, incendis, plagues, etc.), tot i que sí s'observa un augment en el creixement a l'any 1984, possiblement aquest augment sigui degut a causes climàtiques, ja que els arbres de fora de la massa forestal també presenten aquest augment en les taxes de creixement. A més, el 1984 destaca per ser un any amb 598 mm de precipitació (valor bastant normal a Begues), però amb les temperatures relativament baixes (temperatura mitjana anual de 12,23° C, però el més important és que el període de sequera fou interromput per les elevades precipitacions a l'agost (82 mm).

### **Funcions Resposta: relacions creixement - clima.**

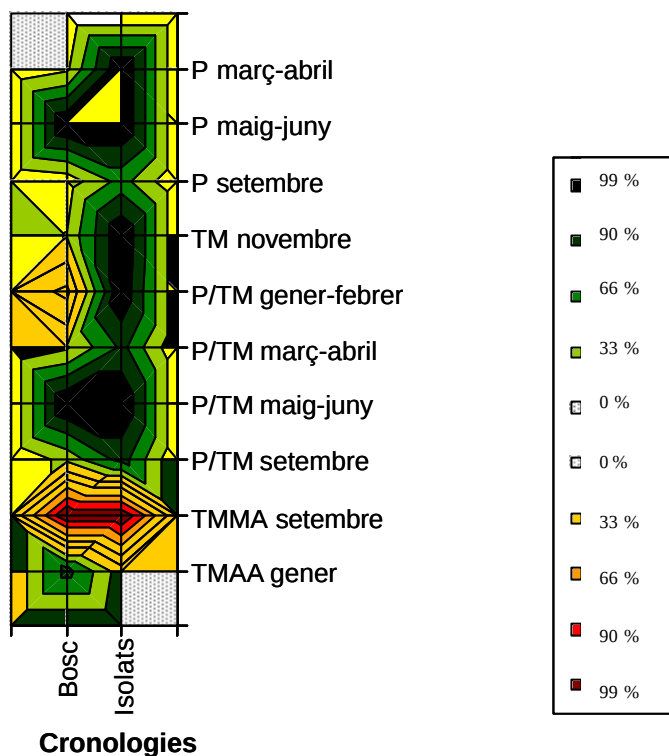
Els resultats obtinguts es mostren a la figura 19, en la qual els colors vermells i grocs indiquen que la variable climàtica (abscisses) té un efecte negatiu sobre el creixement dels arbres (ordenades), i els colors verds indiquen que la relació és positiva. La intensitat del color és major quan més significativa és la relació tal i com indica la llegenda. En aquesta figura es mostra el model de funció resposta obtingut de manera que les variables climàtiques amb poc pes sobre el creixement radial del pi blanc al Garraf han estat eliminades del model i per tant no hi apareixen. També s'han agrupat variables per a fer la figura més entenedora. La significació del model es mostra a la figura 20.

La figura 19 mostra que en tots dos casos (arbres del bosc i arbres isolats) les variables que més efecte tenen sobre el creixement són les precipitacions i l'índex d'aridesa (P/TM). Aquestes variables tenen efecte positiu, de manera que es posa de manifest que la manca d'aigua és el principal limitant del creixement del pi blanc al Garraf. Cal destacar que aquesta relació no és significativa durant tot l'any, sinó que només afecten al creixement les precipitacions del març fins al juny, i al setembre. Comparant aquest resultat amb el patró de creixement obtingut amb les sèries enregistrades amb els dendròmetres (veure apartat corresponent), s'observa que durant aquests mesos de primavera és quan el pi blanc produeix gran part del seu creixement radial (taxes màximes), i que durant els mesos d'estiu el pi blanc pot aturar el seu creixement, de manera que és com si estigués latent i per tant no li afecten les precipitacions, després (al setembre) reinicia la seva activitat tornant a estar afectat per la disponibilitat hídrica (P/TM). Els resultats obtinguts també indiquen que l'inici del període de creixement està condicionat pel fet que les temperatures mitjanes siguin elevades (efecte significatiu de P/TM al gener i al febrer. A més, el fet que les temperatures màximes del gener tinguin en el model obtingut un efecte positiu i significatiu fa pensar que són aquestes les responsables del inici del període de creixement.

L'efecte negatiu de les temperatures màximes, juntament amb el positiu de P/TM al setembre s'explica pel fet que el període sec al Garraf pot allargar-se fins a ben entrat el setembre (Fig. 7), de manera que la reactivació del creixement radial al pi blanc a la tardor està condicionat per les pluges de tardor (setembre), i quan aquestes són escasses el fet que les temperatures siguin elevades (sobretot les màximes que es donen durant el dia) fa que els arbres necessitin més aigua degut a la major evapotranspiració. En canvi, al novembre (quan ja no hi ha sequera) desapareix l'efecte de les

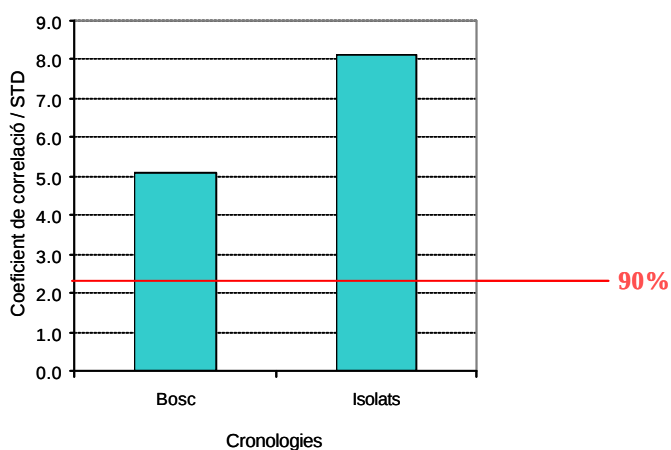
precipitacions, i si les temperatures són elevades, el pi blanc continua creixent (efecte positiu de les TM al novembre).

**Funció Resposta: Creixement radial = f(clima Begues).  
Període 1951-1999**



**Figura 19.** Funció resposta del creixement radial del pi blanc (arbres del bosc i arbres que creixen isolats) al Garraf amb les dades climàtiques de Begues pel període 1951-1999.

**CORR / STD de la verificació del model de les funcions resposta.  
Creixement = f(clima Begues). Període 1951-1999.**



**Figura 20.** Significació global dels models de funció resposta obtinguts per cada cronologia (arbres del bosc i arbres isolats).

A la figura també es posa de manifest que tot i que a grans trets les variables que condicionen el creixement dins i fora del bosc són les mateixes i tenen el mateix tipus d'efecte, els arbres que creixen isolats sobre les roques són molt més sensibles a les condicions climàtiques. Aquest resultat és lògic tenint en compte que els arbres del bosc, creixen damunt bancals, on el sòl és abundant i amb gran capacitat de reserva d'aigua. En canvi, els arbres isolats, al créixer entre les fissures de roques calcàries, no tenen gaire aigua retinguda al sòl essent molt més sensibles a la quantitat de pluja que cau en cada moment.

## CONCLUSIONS

 El clima de Begues és mediterrani, caracteritzat per presentar hiverns suaus i estius secs i calorosos. El període sec acostuma a donar-se entre els mesos de juny i setembre, tot i que en alguns anys a finals d'hivern també existeix un curt període sec.

 La gran variabilitat climàtica de la zona es posa de manifest en la diversitat de condicions enregistrades des de 1995. L'any 1996 i el 2002 destaquen com a anys amb un període sec molt lleu i curt; mentre que els anys amb més estrès hídric han estat el 2003.

 Basant-nos en els resultats obtinguts, el creixement radial del pi blanc presenta un clar patró bimodal degut al doble estrès climàtic, característic de les regions amb clima mediterrani: les baixes temperatures hivernals i la sequera estival. El primer pic de creixement, i el més elevat, es dona al maig i el segon, al setembre. Entre els dos pics, el creixement disminueix sense arribar a aturar-se. El creixement radial tan sols s'atura al gener, quan les temperatures són més baixes. Tot i així, aquest patró s'adequa a les condicions hídriques de cada any, les quals determinen les taxes de creixement.

 El període de creixement del pi blanc comença la primera quinzena de febrer, i acaba entre principis i finals de desembre, segons l'any. Malgrat que a l'estiu les taxes de creixement del tronc disminueixen substancialment, el creixement radial del pi blanc al Garraf només s'atura en els arbres de la solana quan la sequera és molt acusada (ex: 1995, 2001, i 2003).

 L'inici de l'activitat del càmbium ve determinada per les temperatures. Es necessari que la temperatura mitjana (TM) superi els 7,65° C perquè comenci el creixement en gruix del tronc. Un cop superat aquest llindar tèrmic, les taxes de creixement radial augmenten quan més elevades siguin les TM fins a finals d'abril, quan normalment comença a haver manca d'aigua. Entre els mesos de maig i octubre les escasses precipitacions són les que limiten el creixement, i de forma simultània les elevades temperatures causen que la vegetació necessiti més aigua donat que les pèrdues per evapotranspiració són més elevades. Finalment, des de l'octubre fins al final del període de creixement (desembre) la TM torna a afectar el creixement de forma positiva.

 Els resultats basats en l'anàlisi de quines característiques de l'entorn immediat afecten més les taxes de creixement radial del pi blanc han posat de manifest que la orientació del vessant i el percentatge d'aflorament rocós són els factors que més afecten. També s'ha mostrat que quan més gran és el volum de la capçada del arbre més altes són les seves taxes de creixement.

 Les cronologies establertes pel Garraf indiquen que els arbres que creixen isolats en les fissures de les roques tenen com a mínim 90 anys, mentre que els que formen part del bosc daten de la dècada del 1930. Aquest resultat indica que segurament el camp (els arbres creixen damunt antics bancals) foren abandonats durant la guerra.

 Els paràmetres de les cronologies indiquen que es tracta d'un bosc amb elevada sensibilitat a les condicions ambientals i amb una forta homogeneïtat en el creixement dels diferents arbres. Malgrat que el creixement radial dels arbres del bosc està fortament afectat per les condicions climàtiques de cada any, els resultats obtinguts indiquen que són molt més sensibles al clima els arbres amb creixement isolat damunt les roques.

 En la història recent del bosc destaquen dues fases: la d'iniciació (1948-1974) i la fase de tancament de la volta de les capçades (1974-1999). No s'han detectat canvis significatius en les taxes de creixement que puguin atribuir-se a pertorbacions (tales, incendis, plagues, etc.).

 Les funcions resposta obtingudes indiquen que el principal limitant del creixement del pi blanc al Garraf ha estat la manca d'aigua (índex d'aridesa P/TM) entre els mesos de març i juny pel període 1951-1999. En canvi no els afecten de forma significativa les pluges estivals donat que segurament aturen el seu creixement quan les condicions hídriques són estressants. Aquest resultat posa de manifest l'elevada flexibilitat del creixement del pi blanc i la seva gran capacitat d'adaptació a la manca d'aigua. Durant la tardor, el seu creixement depèn de les precipitacions i de les temperatures (relació positiva en ambdós casos).

## BIBLIOGRAFIA

- Aniol, R. W., 1983. Tree-Ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia*, 1: 45-53.
- Bagnuls, F. & Gaussen, H. 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.* 88, Toulouse, pp. 193-239.
- Blasing, T. J.; DuVick, D. N. & Cook, E. R. 1983. Filtering the effects of competition from ring-width series. *Tree Ring Bulletin*, 43: 19-30.
- Bosch, O. & Gutiérrez, E. 1999. La sucesión en los bosques de *Pinus uncinata* del Pirineo. De los anillos de crecimiento a la historia del bosque. *Ecología*, 13: 133-171.
- Cámara, M. A. 1999. *Temperamento y aplicaciones del pino carrasco (Pinus halepensis Mill.) en España. Análisis mediante un S.I.G.* Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela superior de Ingenieros de Montes. 277 pp.
- Camarero, J. J., Gutiérrez, E. & Fortin, M. J. 1998: Estructura espacial del límite altitudinal del bosque en el Tèsol, Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici. In: *La investigació al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici: IV Jornades de Recerca*. Pp. 75-94.
- Ceballos, L. & Ruíz de la Torre, J., 1979. *Árboles y arbustos*. Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, 512 pp.
- Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A., 1990. *Methods of dendrochronology*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 394 pp.
- Cook, E. R. & Peters, K. 1981. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41: 45-53.
- Costa, M.; Morla, C. & Sainz, H. (Eds.). 1998. *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Ed. Planeta, 597 pp.
- Creus-Novau, J. 1991–1992. Tendencia secular de la temperatura de Mayo en el Pirineo Oriental. *Notes de Geografia Fisica*. 21–22: 41–49.
- Efron, B. 1979. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7: 1-26.
- Fernández, C. A. & Manrique, E. 1997 *Nueva metodología para la reconstrucción dendroclimática y aplicaciones más importantes*. Ed. Faster, Madrid. 127 pp.
- Folch, R. 1981. *La vegetació dels Països Catalans*. Ed. Ketres, Barcelona. 513 pp.
- Fritts, H. C. 1962. *Climate from tree-rings*. Cambridge University Press, Cambridge. 457 pp.
- Fritts, H. C., Mosimann, J. E. & Bortorff, C. P. 1969. A revised computer program for standardizing tree-ring series. *Tree Ring Bulletin*, 29: 15-20.
- Fritts, H. C. 1971. Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research*, 1: 419-449.
- Fritts, H. C., 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press, London, 553 pp.

- Gates, D. M. 1994. *Climate Change and its biological consequences*. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts. 280 pp.
- Gutiérrez, E. 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Oecol. Plant.* 9 (3): 301-309.
- Gutiérrez, E. 1989. Dendroclimatological study of *Pinus sylvestris* in southern Catalonia (Spain). *Tree-Ring Bulletin*, 49: 1-9.
- Gutiérrez, E. 1991. Climate tree-growth relationships of *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Oecologica* 12: 213-225.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 68-78.
- Houghton, J. T.; Meira Filho, L. G.; Callander, B. A.; Harris, N.; Katterberg, A. & Maskell, K. 1996. *Climate change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 44 pp.
- Hughes, M. K.; Kelly, P. M.; Pilcher, J. R. & LaMarche, V. C. 1982. Climatic signals in British Isles tree-ring chronologies. *Nature*, 272: 605-606
- IPCC, 2001. Cambio climático. Informe. <http://www.ipc.ch/pub/un/syrspanish/spm.pdf>
- Keller, T. 1999. Variabilité climatique interannuelle quantifiée à partir de la densité et des isotopes stables de la cellulose du bois. Tesis doctoral. Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III. 175 pp. Ne'eman & Trabaud (Ed.). 2000. *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and Pinus brutia forest ecosystems in the Mediterranean Basin*. Backhuys Publishers, Leiden. 406 pp.
- Larcher, W. 1977. *Ecofisiología Vegetal*. Ed. Omega, Barcelona. 305 pp.
- Legendre P. & Legendre L. 1998. *Numerical ecology*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 853 pp.
- Panareda, J. M. 1986. *Descobrim el Garraf*. Col·lecció Pau i Vila, No. 6. Diputació de Barcelona. Publicacions i edicions de la Universitat de Barcelona. 163 pp.
- Riba D, Bolós O, Panareda JH, Nuet N, González J. 1979. *Geografia física dels Països Catalans*. Ed. Ketres, Barcelona. 172 pp.
- Ribas, M. 1999. *Resposta dels boscos de pi negre (Pinus uncinata Ram.) al canvi global: tendències en el creixement i en la regeneració*. Memòria del Màster Experimental en Biologia. Universitat de Barcelona. 93 pp.
- Rivas-Martínez, S. 1985. Series de vegetación de la Península Ibérica. Memòria del mapa de series de vegetación de España 1:400.000. Monografías del ICONA, Madrid. 268 pp.
- Reinsch, C. H. 1967. Smoothing by spline functions. *Numerische Mathematik*, 10: 177-183.
- Rice, J. R. 1969. *The approximation of functions*. Vol. 2. Addison-Wesley, reading, Mass.
- Schweingruber, F. H., 1996. *Tree Rings and Environment Dendroecology*. Paul Haupt Berne Press, Viena, 609 pp.

- ter Braak, C.J.F. 1987. Ordination pp. 91–173. In Jongman R.H., ter Braak, C.J.F. & van Tongeren, O.F.R. (Eds.). *Data analysis in community ecology*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- ter Braak, C.J.F. and Prentice, I. C. 1988. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research* 18: 271–317.
- Wigley, T. M. L. 1992. *Future climate in the Mediterranean basin with particular emphasis on changes in precipitation*, In Jeftic, L.; Milliman, J. D. & Sestini, G. (Eds.). *Climatic Change and the Mediterranean: environmental and societal impacts of climate change and sea-level rise in the Mediterranean region*. United Nations Environmental Programme, Pp. 15-44.
- World, S. 1974. Spline functions in data analysis. *Technometrics*, 16: 1-11.
- Yamaguchi, D. K. 1990. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Can. J. For. Res.*, 21: 414-416.