

Departament d'Ecologia
Universitat de Barcelona

**CLIMATE and ATMOSPHERIC CO₂ EFFECTS on IBERIAN PINE
FORESTS assessed by TREE-RING CHRONOLOGIES and their
potential for CLIMATIC RECONSTRUCTIONS**

**Efectes del clima i del CO₂ atmosfèric en pinedes ibèriques avaluats mitjançant
cronologies d'anells dels arbres i el seu potencial per reconstruir el clima**

Laia Andreu Hayles
PhD DISSERTATION

CATALAN SUMMARY

INTRODUCCIÓ

MARC GENERAL

“Existeix una necessitat urgent d’un major enteniment de la naturalesa i les causes de les fluctuacions en el clima que han succeït des de la darrera edat de gel. En un món que afronta un creixement de la població i un accelerat ús de l’energia, l’aigua i els recursos alimentaris, existeix una pressió per a la elaboració d’estimes del canvi climàtic per a les properes dècades. Aquesta demanda no es pot satisfer actualment degut al limitat coneixement de que disposem del curs i les causes del clima del passat. Els registres instrumentals de variables climàtiques com la temperatura, pressió i precipitacions anteriors al començament del segle XX són escasses a la major part del planeta. Per tal de millorar el coneixement respecte a les variacions climàtiques en escales temporals superiors a unes poques dècades, es necessiten registres climàtics de diversos segles per a la major part del planeta” (Hughes *et al.* 1982). Actualment, després de 25 anys de recerca climàtica, tot i els nombrosos intents duts a terme per reconstruir el clima del passat (e.g. Jones *et al.* 1998; Mann *et al.* 1999; Briffa 2000; Esper *et al.* 2002; Guiot *et al.* 2005; Moberg *et al.* 2005; Wilson *et al.* 2005), els resultats varien molt, particularment quan fan referència a canvis a llarg termini (Briffa i Osborn 2002; Esper *et al.* 2004; D’Arrigo *et al.* 2006). Com a conseqüència, la comunitat científica encara està invertint temps i recursos en determinar fins a quin punt els canvis globals actuals són inusuals, així com per millorar els models de predicció a llarg termini. L’any passat la Unió Europea va finançar el projecte Millennium (“European climate of the last millennium”, IP 017008, <http://ralph.swan.ac.uk/millennium/>) adreçat a respondre la pregunta clau: “*si la magnitud i la taxa del canvi climàtic al segle XX excedeix la variabilitat natural del clima Europeu dels darrers mil anys*”. Aquest és només un exemple per il·lustrar que la necessitat de conèixer el clima del passat, del present i del futur és encara una demanda de la nostra societat.

Les variacions en el clima poden succeir com a resultat de canvis naturals en el sistema climàtic, com per exemple variacions en la força de la radiació solar entrant o canvis en la concentració d’aerosols provinents d’erupcions volcàniques. No obstant això, l’important rol que l’activitat humana està jugant en l’actual canvi climàtic global està

àmpliament acceptat (Jacoby i D'Arrigo 1997; Mann *et al.* 1998; Crowley 2000; Stott *et al.* 2000; IPCC 2001a, 2007a). Per exemple, els increments en les concentracions atmosfèriques d'aerosols i gasos d'efecte hivernacle des del període pre-industrial, deguts principalment a l'ús de combustibles fòssils i en menor mesura al canvi en l'ús del sol, són considerats agents causants del canvi climàtic. Des de l'era industrial, les concentracions atmosfèriques de CO₂ han incrementat de 280 ppm al 1750 a 379 ppm al 2005, excedint de lluny al 2005 el rang natural de concentració de CO₂ dels darrers 650000 anys (180 – 300 ppm), determinat a partir dels registres de gel (IPCC 2007a). El *Third Assessment Report* va publicar que la temperatura superficial global mitjana va incrementar en 0.6 ± 0.2 °C de 1901 a 2000 (IPCC 2001a). Malgrat això, la tendència lineal actualitzada pels darrers 100 anys (1906 – 2005) de 0.74 °C (de 0.56°C a 0.92°C) és encara major. A més, la tendència lineal d'escalfament dels darrers 50 anys (0.13 °C per dècada) és prop del doble de la dels últims 100 anys i situa onze dels darrers dotze anys (1995 – 2006) entre els 12 anys més càlids en el registre instrumental des de 1850 (IPCC 2007a). Encara que qualsevol canvi climàtic induït per l'home es vegi inclòs en un context de variacions naturals, gran part del increment observat en la temperatura mitjana global des de meitat del segle XX és molt probablement degut al ja descrit increment en la concentració de gasos d'efecte hivernacle antropogènics (IPCC 2007a). D'altra banda, nombrosos canvis de llarg termini en el clima a escala continental, regional i oceànica han estat observats i recopilats al IPCC (2007a). Això inclou canvis generals en la quantitat de precipitacions i fenòmens meteorològics extrems. Malgrat que les precipitacions són altament variables en l'espai i en el temps, han estat detectades tendències a llarg termini des de 1900 fins a 2005 en moltes regions. Sequeres més intenses i més llargues s'han observat a regions més àmplies des del 1970; la freqüència de precipitacions violentes ha incrementat a la majoria d'àrees; i canvis generalitzats en temperatures extremes s'han estat observant durant el darrers 50 anys (els dies freds, les nits fredes i les glaçades han passat a ser menys freqüents, mentre que els dies i les nits càlides i les onades de calor han incrementat la seva freqüència).

En general, les observacions d'alguns paràmetres globals clau comparades amb les prediccions del IPCC 2001a no resulten exagerades, i fins i tot podrien en alguns aspectes haver subestimat els canvis (Rahmstorf *et al.* 2007). Una avaluació global de les dades des de 1970 ha demostrat com l'escalfament antropogènic ha tingut una

influència discernible en molts sistemes físic i biològics. El 89% de 29000 sèries d'observacions pertanyents a 75 estudis, que mostraven canvis significatius en sistemes físics i biològics, són consistents amb la direcció dels canvis esperats en resposta a l'escalfament (IPCC 2007b). Molts canvis en la fenologia, l'àrea de distribució, amplitud ecològica, biodiversitat, composició i dinàmiques de la comunitat foren observats a les acaballes del segle XX (Menzel i Fabian 1999; Barber *et al.* 2000; Chapin *et al.* 2000; Walther *et al.* 2002). Connexions significatives entre aquests fenòmens i el canvi climàtic actual han sigut establertes (Parmesan i Yohe 2003; Root *et al.* 2003; Parmesan 2006). Addicionalment, diversos canvis biològics aparentment graduals varen ser relacionats amb respostes a situacions meteorològiques i climàtiques extremes (Easterling *et al.* 2000). Aquest increment en la variabilitat climàtica pot tenir efectes importants en els ecosistemes perquè, malgrat l'enorme capacitat d'adaptació dels éssers vius, moltes espècies poden no ser capaces d'adaptar-se com a conseqüència de la velocitat d'aquests canvis.

El canvi climàtic és molt complex i no és homogeni al voltant del planeta, variant en funció de regions i ecosistemes. Al sud d'Europa, les prediccions del canvi climàtic projecten pitjors condicions (altes temperatures i sequeres), en un àrea ja vulnerable a la variabilitat climàtica, comportant una reducció de la disponibilitat d'aigua, del potencial hidroelèctric i de la producció dels conreus, així com un increment en les onades de calor i en la freqüència d'incendis naturals (IPCC 2007b).

A la Península Ibèrica, temperatures excepcionalment altes i una major variabilitat climàtica interanual han caracteritzat el clima durant la segona meitat del segle XX (Font Tullot 1988; Romero *et al.* 1998; De Luis *et al.* 2000; IPCC 2001b; Giorgi *et al.* 2004). Alguns models que avaluen els impactes dels canvis globals en la distribució de les espècies assenyalen Espanya com una de les regions amb les prediccions més dramàtiques en relació a l'extinció d'espècies (Bakkenes *et al.* 2002). Simulacions de models de creixement per a les regions mediterrànies, sempre i quan hi hagi disponibilitat d'aigua, prediuen un increment en l'índex d'àrea foliar, una reducció en la vida mitjana de la fulla (en espècies de fulla perenne) i una major producció en resposta a l'increment de la concentració de CO₂; no obstant això, la temperatura i les precipitacions podrien limitar el creixement si les darreres són escasses (Sabaté *et al.* 2002). Diversos estudis reporten com el canvi climàtic afecta o pot afectar els

ecosistemes terrestres ibèrics. L'increment en la concentració del CO₂ atmosfèric podria produir un increment en el creixement de les plantes (Peñuelas *et al.* 1995) o en les taxes fotosintètiques (López *et al.* 1997). Per altra banda, l'escalfament podria produir una prolongació del període de creixement (Peñuelas i Filella 2001) i/o canvis en la distribució d'espècies de plantes i biomes (Peñuelas i Boada 2003). Malgrat això, l'estrès hídric juntament amb una major evapotranspiració (deguda a una major temperatura i/o menors precipitacions) poden potenciar la seva influència com un factor limitant del creixement de la biomassa vegetal o la taxa fotosintètica (López *et al.* 1997; Ogaya *et al.* 2003; Peñuelas *et al.* 2004), produir danys en plantes llenyoses (Peñuelas *et al.* 2001; Lloret *et al.* 2004) i fins i tot en algunes situacions, induir mortalitat (Martínez-Vilalta i Piñol 2002).

Dos objectius principals divideixen aquesta Tesi en dos blocs, tot tenint en compte que les necessitats d'entendre les fluctuacions del clima actual encara representen un requeriment important per la població del segle XXI i l'enorme ventall de respostes observades a aquests canvis depenent de les regions, els ecosistemes i/o les espècies. El primer objectiu principal és avaluar com els canvis en el clima i en la concentració de CO₂ atmosfèric estan afectant les pinedes ibèriques. El segon objectiu és extreure el senyal climàtic registrat en els arbres dels boscos estudiats amb la intenció de reconstruir el clima del passat. Així doncs, utilitzarem la relació entre els arbres i el clima en dues direccions: avaluant els efectes del clima sobre els boscos, i després, utilitzant aquests resultats per estimar les condicions climàtiques anteriors a l'existència de registres instrumentals. La metodologia utilitzada està basada en l'estudi de cronologies de gruix i $\delta^{13}\text{C}$ dels anells d'arbres establertes a diferent localitats al llarg del nord i est de la Península Ibèrica.

RECONSTRUCCIONS PALEOCLIMÀTIQUES

Com ja s'ha esmentat en la secció anterior, un millor enteniment dels canvis climàtics en el passat podria ser molt valuós per determinar fins a quin punt són inusuals els actuals canvis globals, així com per millorar la fiabilitat dels models predictius. Addicionalment, la reconstrucció del clima en el passat pot contribuir a explicar alguns canvis en la història de la humanitat o processos naturals com l'evolució de les espècies o el seu actual rang de distribució fitogeogràfica (Ferrio 2005).

Donat que els registres climàtics instrumentals previs al segle XX són escassos, les estimes de la variabilitat climàtica global durant els passats segles estan basades en indicadors “*proxy*” indirectes. Un indicador *proxy* és un registre natural o documental anterior a les dades climàtiques instrumentals que va enrere en el temps i conté algun tipus d’informació ambiental o climàtica. Reconstruccions paleoambientals de les variacions climàtiques o les condicions ambientals que succeïren en el passat es poden dur a terme utilitzant aquest tipus de *proxies*. Procediments de calibratge i validació creuada acurats són necessaris per establir una relació fiable entre un indicador *proxy* i la variable/s climàtica que se suposa que representa, proveint una funció de “transferència” mitjançant la qual les condicions del clima del passat poden ser estimades (Ferrio 2005).

Hi ha nombrosos registres naturals amb informació paleoclimàtica com per exemple testimonis de gel, registres pol·línics, sediments de llacs i oceans, esculls coral·lins o mesures en perforacions en el sòl o *boreholes*. No obstant això, McCarroll i Loader (2004) van apuntar que cap d’ells proveïa de les dues grans avantatges dels anells dels arbres. La primera avantatja és la consecució d’una perfecta resolució anual, doncs les tècniques dendrocronològiques permeten la datació exacte de cada anell. La segona avantatja és la possibilitat de definir intervals de confiança calculant la variabilitat de cada any, doncs les cronologies d’anells dels arbres es construeixen superposant diverses sèries d’arbres individuals. Juntament amb això, el fet que els arbres estiguin àmpliament dispersats en el territori, introdueix la possibilitat d’examinar el clima del passat en un ampli ventall de localitzacions geogràfiques, aspecte molt útil per predir les conseqüències del futur canvi climàtic combinant-ho amb les actuals estimes de les condicions globals o hemisfèriques.

EL CLIMA I ELS ANELLS DELS ARBRES

L’afirmació que el clima influeix el creixement dels arbres està generalment acceptada (Schweingruber 1996). En aquells llocs on els arbres formen capes de creixement anual, les característiques d’aquestes capes o anells reflecteixen les condicions sota les que varen ser formades. Les diferències entre els anells de creixement poden ser sincròniques en molts arbres en una mateixa regió indicant que el creixement està influenciat d’alguna manera per un conjunt comú de factors externs.

Quan les similituds en les variacions del creixement són fortes i extenses espacialment, s'assumeix que el clima està relacionat amb els agents externs que estan evidenciant els patrons observats de variabilitat comú entre els arbres. No hi ha altres factors ambientals susceptibles d'estar actuant en el mateix rang en l'espai, el temps i dominis de freqüència. La dendroclimatologia es basa en la premissa que és possible extreure un registre de les variables climàtiques emmagatzemades en els anells dels arbres de fusta formada en el passat (Hughes *et al.* 1982).

Des dels treballs pioners de Douglass al 1914 (Fritts 1976), els anells dels arbres han estat emprats de forma generalitzada com a *proxies* paleoclimàtics. La dendroclimatologia, la ciència de la reconstrucció del clima mitjançant l'ús dels anells de creixement dels arbres, és una ben desenvolupada subdisciplina de la dendrocronologia. El prefix *dendro* prové del mot grec per arbre (*dendron*), i la paraula *cronologia* és el nom de la ciència que estudia el temps i mira d'assignar dates a esdeveniments particulars (Fritts 1976). La dendrocronologia és una disciplina que permet la identificació de l'any exacte en què cada anell d'un arbre es va formar i assigna dates concretes del calendari als anells amb absoluta precisió, comparant patrons d'anells amples i estrets i altres característiques anatòmiques (per exemple, fluctuacions en la densitat) entre diverses mostres d'anells d'arbres. El mateix tipus de comparacions es poden fer entre arbres vius ja datats i fragments de fusta de datació desconeguda provinents d'edificis vells, troncs caiguts, soques, troncs enfonsats i altres tipus de materials sub-fòssils, per tal d'establir l'any exacte en què el fragment formava part d'un arbre viu en creixement. El procediment per tal d'establir la correspondència dels patrons d'anells entre arbres o fragments de fusta en un àrea determinada s'anomena datació creuada o *cross-dating* (Fritts 1976).

El creixement dels arbres no està únicament determinat pel clima, sinó també per altres factors no climàtics com la tendència deguda a la relació entre l'edat i la mida dels individus, dinàmiques internes de les poblacions forestals, pertorbacions exògenes o particularitats individuals de cada arbre. Per als estudis dendroclimàtics, aquesta variabilitat no climàtica es considera soroll que ha de ser eliminat mitjançant estandaritzacions, conservant únicament la informació comú entre els arbres o senyal. L'estandardització transforma les sèries de gruix dels anells en índexs que tenen una mitjana definida igual a 1 i una variància relativament constant (sèries estacionàries),

ajustant una corba a les sèries d'anells i dividint el valor del gruix de cada anell (observat) pel corresponent valor de la corba (predit). Corbes exponencials negatives, *splines* cúbiques suavitzades de diferent longitud d'ona (Cook i Peters 1981) o filtres de alta i baixa freqüència han estat utilitzats depenent de l'objectiu de l'estudi i de les característiques de les sèries de dades. També es poden aplicar addicionalment tècniques per a la reducció de soroll com l'estimació de la mitjana robusta o models autoregressius. El senyal comú és una quantitat estadística que representa la variabilitat comú present en totes les sèries d'anells d'arbres en un lloc determinat (Cook i Briffa 1990). La variància de qualsevol sèrie conté aquest senyal comú, al mateix temps però que cada sèrie presenta també una variabilitat específica de la mostra o de l'arbre (soroll estadístic). Com que aquest soroll no està correlacionat d'una mostra a l'altra, pot ser eliminat depenent del nombre de sèries promitjades. Així doncs, el procés d'estandardització té dos objectius: (1) eliminar de les sèries de gruix d'anells les senyals no climàtiques relacionades amb les tendències degudes a l'edat o altres causes; i (2) permetre que els valors estandarditzats resultants de les mostres individuals puguin ser promitjats (Cook i Briffa 1990). Malgrat això, cal tenir en compte els risc d'eliminar la variabilitat de baixa freqüència a l'utilitzar aquests tractaments estadístics (Cook *et al.* 1995). El resultat de l'estandardització és la *cronologia mitjana o mestra* que representa el patró comú de creixement en una regió, sent una estimació del senyal comú compartit pels arbres analitzats i que generalment es pot relacionar amb el clima.

GRUIX I DENSITAT DELS ANELLS DELS ARBRES

El clima del passat pot ser reconstruït partint dels canvis d'un any a l'altre en el gruix dels anells i la seva densitat (e.g. Fritts 1976). Malgrat que els registres de densitat tenen l'avantatge que el senyal comú entre arbres és generalment més fort que entre les sèries de gruix d'anells (e.g. Wilson i Luckman 2003), fins avui, un menor nombre de cronologies de densitat han estat establertes probablement degut a què aquest procediment és molt més costós econòmicament que la mesura del gruix dels anells. Les variacions en el gruix i en la densitat de la fusta tardana dels anells anuals de creixement s'han emprat de forma més exitosa en reconstruccions climàtiques a llocs on el creixement dels arbres està limitat per un sol factor dominant. La temperatura és, per exemple, el principal factor limitant en regions fredes com Fennoscàndia (Briffa *et al.*

1990, 1992), Alps europeus (Büntgen *et al.* 2006), Mongòlia (D'Arrigo *et al.* 2000), o l'hemisferi nord (Esper *et al.* 2002; Briffa *et al.* 2004); mentre que les precipitacions són el factor més limitant en regions àrides o semi-àrides com Mèxic (Díaz *et al.* 2001; Cleaveland *et al.* 2003), Turquia (Touchan *et al.* 2003) o el Marroc (Till i Guiot 1990).

Els arbres situats als límits de la seva àrea natural de distribució (altitudinal o latitudinal) són particularment sensibles a les variacions climàtiques (Fritts 1976), donat que amb força freqüència s'hi pot fàcilment identificar un factor limitant dels processos fisiològics. Per exemple, s'han descrit diferents respostes en el creixement al llarg de transsectes altitudinals (Tardif *et al.* 2003; Adams i Kolb 2004). Emperò, els arbres vius més vells no sempre estan situats als llocs més desitjables i adequats. Per exemple, a regions temperades com Europa, on moltes espècies viuen al rang òptim de la seva àrea de distribució, algunes vegades les relacions entre el clima i el creixement no es poden establir. L'elevada complexitat en les respostes dels arbres al clima fa que la informació que es pot extreure d'aquestes sèries d'anells anuals de creixement sigui bastant pobre. La proporció d'isòtops als anells dels arbres té l'avantatge de què els controls fisiològics de les seves variacions són raonablement ben coneguts i relativament simples comparats amb la quantitat de factors que controlen l'increment del creixement anual (McCarroll i Loader 2004). Respecte aquest punt, l'ús d'isòtops estables en els anells dels arbres pot ser especialment prometedora, ja que el ràpid desenvolupament tècnic en els darrers anys ha permès establir cronologies mil·lenàries (Helle i Schleser 2004). Mitjançant les mesures dels isòtops estables es pot treure més partit a les cronologies d'anells anuals de creixement, evitant alguns dels problemes associats amb les característiques de les sèries de gruix i densitat que fan necessaris l'aplicació de mètodes d'estandardització.

ISÒTOPS ESTABLES DEL CARBONI EN LA RECERCA EN VEGETALS

Carboni, oxigen i hidrogen són els tres elements principals de la fusta i tots tres tenen més d'un isòtop estable. Malgrat que aquests isòtops estables tenen propietats químiques gairebé idèntiques, la diferència de massa permet que mitjançant processos químics, físics o biològics es produeixi una discriminació en contra d'un d'ells, de manera que poden transmetre senyals ambientals (McCarroll i Loader 2004). Aquesta és només una petita introducció als isòtops estables del carboni en la recerca en vegetals,

donat que aquesta tesi està centrada en l'estudi de cronologies d'anells d'arbres en les quals aquests isòtops estables van ser analitzats.

El número atòmic és el nombre de protons presents al nucli i defineix cada element. Emperò, el nucli d'un element determinat pot tenir un número variable de neutrons. Els àtoms d'un mateix element que difereixen en el nombre de neutrons presents al nucli s'anomenen isòtops i aquest nombre variable de neutrons és el responsable que els diferents isòtops d'un mateix element tinguin diferent massa. El número de massa o pes atòmic, indicat a dalt a l'esquerra dels símbols dels elements, és la suma dels nombre de protons i neutrons d'un isòtop. Per exemple, en el cas del carboni, tots els isòtops tenen un nombre constant de 6 protons i un nombre variable de 6, 7 o 8 neutrons, donant lloc a àtoms de carboni amb una massa atòmica de 12, 13 o 14, anomenats com ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C , respectivament. El ^{14}C és un isòtop radioactiu o inestable que es va desintegrant de forma espontània en el temps. Aquesta qualitat és utilitzada per datar materials. D'altra banda, el ^{12}C i el ^{13}C són isòtops no radioactius o estables que romanen invariables en el temps a escala geològica. Gairebé el 98.89% del CO_2 atmosfèric està format pel més lleuger dels isòtops de carboni (^{12}C), mentre que una fracció menor, 1.11%, està formada per l'isòtop pesat (^{13}C) (Ehleringer i Rundel 1988).

Està acceptat per conveni que la ràtio del ^{13}C respecte de ^{12}C s'expressa com a delta (δ) respecte a un material estàndard de referència per al qual aquesta ràtio és coneguda. La ràtio d'isòtop de carboni ($\delta^{13}\text{C}$) s'expressa en tants per mil (‰) de la següent manera:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000$$

R és el valor per a la ràtio de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, mentre R_{sample} i R_{standard} són les proporcions en les mostres i l'estàndard respectivament. L'estàndard escollit era un subfòssil de belemnita de la formació Pee Dee del sud de Califòrnia el qual es va exhaurir i va ser substituït per la belemnita de Viena o VPDB (Coplen 1995).

Els éssers vius, al igual que tots els materials de l'univers, estan formats per àtoms que poden ser isòtops més o menys freqüents del mateix element. La proporció relativa entre els isòtops lleugers (baixa massa atòmica) i pesats (alta massa atòmica) varia depenent de la seva localització. Algunes substàncies s'enriqueixen per la incorporació d'una major proporció d'isòtops pesats, mentre que altres s'empobreixen sent la proporció d'isòtops lleugers majoritària. A aquest fenomen se l'anomena fraccionament isotòpic.

Com a conseqüència d'aquest fenomen, la composició isotòpica d'un element determinat varia considerablement entre les diferents regions de la Terra. Els components de l'atmosfera poden mostrar proporcions diferents d'isòtops pesats dels mateixos elements que es poden trobar a la litosfera, la hidrosfera o la biosfera. De fet, la proporció també varia depenent de la seva localització específica en cada compartiment, forma de vida o diferents parts d'un mateix organisme.

La concentració mitjana actual de $\delta^{13}\text{C}$ atmosfèric és del -8‰ però era del -6.69‰ al 1956. Aquest valor incrementa anualment a conseqüència de l'ús de combustibles fòssils i de la desforestació (Keeling *et al.* 1979). La vegetació terrestre incorpora CO_2 durant la fotosíntesi, tot discriminant en contra de les molècules més pesades i mostrant preferència pel ^{12}C davant del ^{13}C . Com a conseqüència, el carboni de les plantes terrestres conté una menor proporció de ^{13}C que el carboni del CO_2 atmosfèric. Les fulles i la fusta dels arbres presenten valors de -20‰ i -30‰ respectivament. Això demostra que els arbres estan empobrits pel que fa a ^{13}C en comparació amb l'aire (McCarroll i Loader 2004). Les taxes de discriminació són dependents dels nivells de CO_2 a l'atmosfera, sent més elevats quan les concentracions de CO_2 són més altes.

L'evolució estacional i interanual de la composició isotòpica del CO_2 atmosfèric ($\delta^{13}\text{C}$) varia d'un hemisferi l'altre a causa de la diferent cobertura vegetal. La vegetació a l'hemisferi nord es concentra principalment a latituds mitjanes i altes estant exposada a cicles estacionals d'activitat, mentre que a l'hemisferi sud els boscos plujosos equatorials dominen la majoria de la cobertura vegetal i no pateixen l'efecte de les estacions. Durant el període de creixement, les plantes fan la fotosíntesi i prenen el CO_2 de l'atmosfera preferiblement empobrit en ^{13}C . En conseqüència, el CO_2 restant a l'atmosfera està enriquit en aquest isòtop pesat. Per aquest motiu hi ha una major variació estacional del $\delta^{13}\text{C}$ atmosfèric a l'hemisferi nord que a l'hemisferi sud.

BASES FISIOLÒGIQUES

En molts estudis fisiològics, la discriminació d'isòtops de carboni en contra del ^{13}C (Δ) es calcula de la següent manera, expressant les diferències en la composició isotòpica entre l'aire ($\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$) i la matèria orgànica ($\delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}$) en ‰:

$$\Delta = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}}{1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}/1000}$$

Per a les plantes C3, la relació entre la discriminació dels isòtops de carboni i l'intercanvi de gasos de les fulles ha estat descrita en diversos models, sent la següent equació descrita per Farquhar *et al.* (1982, 1989) la més freqüentment utilitzada:

$$\Delta = a + (b - a) \frac{c_i}{c_a}$$

Els termes c_i i c_a són les concentracions de CO_2 ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) als espais intercel·lulars de les acícules i a l'ambient, respectivament. El fraccionament isotòpic es basa essencialment en dos processos, la difusió i la carboxilació. Durant el primer procés, quan l'aire es difon a través dels estomes fins als espais intercel·lulars on té lloc la carboxilació, el CO_2 que conté l'isòtop lleuger del carboni és difon amb més facilitat. D'aquesta manera l'aire intercel·lular està empobrit en ^{13}C respecte l'aire ambiental. El fraccionament entre $^{13}\text{CO}_2$ i $^{12}\text{CO}_2$ durant la difusió dels CO_2 a través dels estomes (a) és del 4.4‰. En el segon procés, el CO_2 és utilitzat per l'enzim fotosintètic rubisco (RuBP carboxilasa). En general, els processos biològics tendeixen a utilitzar preferentment ^{12}C davant ^{13}C . Aquesta discriminació del $^{13}\text{CO}_2$ per part de rubisco (b) va ser estimada en un 27‰ aproximadament per Farquhar i Richards (1984).

EL $\delta^{13}\text{C}$ I EL CLIMA

Com ja s'ha descrit en l'apartat anterior, els fraccionaments que tenen lloc a causa de la difusió del CO_2 dins els estomes i la carboxilació són constants, i com a conseqüència independents del clima (McCarroll i Pawellek 2001). Així doncs, la ràtio entre el ^{13}C i el ^{12}C en els anells dels arbres està controlada principalment per la ràtio entre c_i i c_a . Si c_i és alta en relació a c_a , la quantitat de CO_2 disponible a les cambres estomàtiques és alta i es produirà doncs una forta discriminació durant la carboxilació donant lloc a valors baixos de $\delta^{13}\text{C}$. En aquest cas, la conductància estomàtica és major que la taxa fotosintètica. D'altra banda, si la conductància estomàtica és menor que la taxa fotosintètica, la concentració de CO_2 intern baixarà hi es produirà una menor discriminació durant la carboxilació, donant lloc a valors més alts de $\delta^{13}\text{C}$ (McCarroll i Loader 2004). D'aquesta manera, el $\delta^{13}\text{C}$ reflecteix la concentració interna de CO_2 i per

tant el balanç entre la conductància estomàtica i la taxa fotosintètica. En ambients secs, el $\delta^{13}\text{C}$ estarà dominat per la conductància estomàtica que està relacionada amb la humitat relativa de l'aire i les precipitacions. En ambients humits, el $\delta^{13}\text{C}$ estarà controlat per la taxa fotosintètica que està relacionada amb el flux de fotons i la temperatura. Aquest senzill model de la influència del clima en les concentracions internes de CO_2 a les cambres estomàtiques i per tant en els valors de $\delta^{13}\text{C}$, fou descrit per McCarroll i Pawellek (2001).

Mapes de sequeres del sud-est dels EEUU pels darrers segles foren construïts utilitzant el $\delta^{13}\text{C}$ dels anells dels arbres (Leavitt *et al.* 2007), ja que el $\delta^{13}\text{C}$ a les plantes pot mostrar períodes d'estrès hídric. Donat que les plantes tendeixen a tancar els seus estomes per tal d'estalviar aigua durant les sequeres, la disponibilitat de CO_2 a les cambres estomàtiques és menor. Com a resultat, la discriminació a les plantes es redueix tendint a valors més alts de $\delta^{13}\text{C}$.

Un llistat dels articles que han utilitzat sèries temporals d'isòtops dels anells dels arbres per a investigació paleoambiental està recollit per McCarroll i Loader (2004). Actualment, no existeixen gaires registres de llargada mil·lenària amb resolució anual de sèries d'isòtops, i encara menys reconstruccions reals, com per exemple una reconstrucció de la precipitació al Pakistan utilitzant registres d'isòtops d'oxigen dels anells dels arbres (Treydte *et al.* 2006). Reconstruccions de més curta durada utilitzant cronologies de $\delta^{13}\text{C}$ i de $\delta^{18}\text{O}$ també són escasses. Malgrat això, es poden donar alguns exemples com reconstruccions de: la precipitació al nord-est d'Espanya pels darrers 400 anys (Planells *et al.* 2006), la temperatura al nord de Finlàndia des de 1640 AC (Gagen *et al.* 2007), sequeres estivals des de 1880 (Raffalli-Delerce *et al.* 2004) o fluctuacions interanuals en la temperatura local estival i l'estrès hídric pels darrers quatre segles a l'oest de França (Masson-Delmotte *et al.* 2005).

OBJECTIUS

Tal i com ja ha estat esmentat a la Introducció, aquesta Tesi ha establert la relació entre els arbres i el clima amb dos objectius principals: (1) avaluar els efectes del clima i de la concentració del CO₂ atmosfèric sobre algunes pinedes ibèriques, (2) extreure la informació climàtica emmagatzemada en aquets boscos per tal de reconstruir el clima del passat. S'han inclòs quatre capítols o articles que desenvolupen les temàtiques citades, a més d'incloure altres qüestions més específiques.

1. Efectes del clima i de la concentració del CO₂ atmosfèric

1.1. Efectes del clima

CAPÍTOL 1: Efectes del clima en la variabilitat del creixement regional en pinedes ibèriques

- Detectar el senyal macroclimàtic compartit per les trenta-vuit cronologies de gruix dels anells dels arbres implicades en aquest estudi.
- Analitzar la variabilitat temporal dels creixement radial i els seus possibles conductors climàtics.
- Avaluar les relacions entre creixement i clima i la seva estabilitat al llarg del temps.

1.2. Efectes de la concentració del CO₂ atmosfèric

CAPÍTOL 2: Efectes de la concentració del CO₂ atmosfèric en cinc pinedes espanyoles

- Estudiar les respostes de cinc pinedes espanyoles a l'increment de la concentració del CO₂ atmosfèric, principalment en relació a les seves composicions isotòpiques i relacions hídriques, analitzant les cronologies de $\delta^{13}\text{C}$ establertes a cada localitat.

2. Reconstruccions climàtiques

2.1. Sensibilitat del gruix i del $\delta^{13}\text{C}$ al clima

CAPÍTOL 3: Sensibilitat del gruix i el $\delta^{13}\text{C}$ dels anells dels arbres al clima en pinedes espanyoles

- Avaluar la naturalesa i força del senyal climàtic registrat a les cronologies de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ dels anells dels arbres de cinc pinedes ibèriques.

2.2. Reconstrucció de la precipitació estival

CAPÍTOL 4: Reconstruccions de la precipitació a Espanya pels darrers 400 anys

- Desenvolupar reconstruccions preliminars de la precipitació estival a Espanya pels darrers 400 anys emprant cronologies d'anells dels arbres de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$.
- Comparar diferents tractaments estadístics de variables d'anells dels arbres utilitzades com a predictors en les funcions de transferència, així com comparar les reconstruccions obtingudes amb dos conjunts diferents de dades meteorològiques.
- Examinar preliminarment els enllaços entre fenòmens atmosfèrics a gran escala i les nostres reconstruccions.

ABSTRACTS

CAPÍTOL 1

Els boscos situats al límit de la distribució geogràfica de les espècies poden aportar informació valuosa sobre la resposta del creixement dels arbres als canvis en les condicions climàtiques. Hem establert 9 cronologies de gruix dels anells amb *Pinus nigra*, 12 amb *P. sylvestris* i 17 amb *P. uncinata* al llarg del nord i est de la Península Ibèrica, allà on aquestes espècies es troben al límit del seu rang natural. La variabilitat en el creixement dels arbres es va analitzar utilitzant un anàlisi de components principals (PCA) pel període comprès entre 1885 i 1992. Malgrat la diversitat d'espècies, hàbitats i règims climàtics, es va identificar un senyal macroclimàtic comú expressat per la primera component principal (PC1). A més, agafant els valors del PC1 com una cronologia regional, es van establir correlacions significatives amb dades meteorològiques espanyoles. La variància compartida per les cronologies, la freqüència d'anells estrets i la variabilitat interanual en el creixement (sensibilitat) van patir un marcat increment durant el període estudiat. Això mostra que el creixement sincrònic entre els boscos incrementà, la qual cosa indica que el clima podria haver-se tornat un factor més limitant pel creixement. Cal remarcar que es va detectar un increment abrupte en la variabilitat comú al final de la segona meitat del segle XX. D'altra banda les funcions resposta fetes amb intervals mòbils mostraren un canvi en les relacions entre el clima i el creixement durant el mateix període. La relació entre el creixement i les temperatures de finals d'estiu i tardor de l'any anterior al creixement (correlació negativa agost-setembre, i positiva novembre) es van tornar més fortes. Per tant, l'increment de l'estrès hídric a finals de l'estiu previ al creixement pot estar relacionat amb la major sincronia entre les localitats, suggerint que era el clima qui estava conduint els canvis en els patrons de creixement. Això concorda amb la tendència creixent de la temperatura observada en aquests mesos. A més, l'increment en la freqüència d'anys extrems i l'augment en la sensibilitat a la segona meitat del segle XX es troben en concordància amb un increment en la variabilitat de les precipitacions durant el període de creixement. La variabilitat en les precipitacions va ser relacionada positivament amb la variabilitat en el creixement dels arbres, però negativament amb el creixement radial. En conclusió, un canvi en el patró de creixement dels arbres i en la

resposta al clima dels boscos estudiats van ser detectats des de la meitat del segle XX i van ser relacionats amb un increment de l'estrès hídric. Aquestes tendències temporals es troben en concordància amb l'augment en la temperatura i en la variabilitat de les precipitacions observat.

CAPÍTOL 2

Com les plantes respondran als canvis en el CO₂ atmosfèric i el clima és encara un pregunta oberta. L'augment en la concentració de CO₂ atmosfèric (c_a) està lligat amb una davallada en de la seva signatura isotòpica ($\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$), causada per l'increment de CO₂ empobrit en ¹³C degut a l'ús de combustibles fòssils i a la desforestació des de la revolució industrial (ca. AD1800). Aquest article descriu les fluctuacions de baixa freqüència en les cronologies del contingut de $\delta^{13}\text{C}$ a la cel·lulosa dels anells dels arbres en cinc pinedes ibèriques des del 1800 AC. Anàlogament a la tendència decreixent del $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$, totes les sèries d'anells de $\delta^{13}\text{C}$ baixaren, més pronunciadament des del 1960. La discriminació del ¹³C (Δ), la concentració intercel·lular a les fulles (c_i) i l'eficiència en l'ús de l'aigua (W_i) de les plantes al llarg del temps es van inferir a partir de les dades de $\delta^{13}\text{C}$ de la cel·lulosa dels anells dels arbres. Les diferències significatives entre els valors de Δ de les cronologies es van trobar probablement degut a les diferents condicions de les localitats i/o característiques específiques de cada espècie. Els canvis al llarg del temps es van estimar utilitzant intervals de 40 anys. Les tendències en la Δ ($\approx c_i/c_a$) romangueren més o menys constant en el temps fins al període de 1960 a 1999, en el qual una gran variabilitat en la Δ fou observada. Un increment en c_i i W_i fou observat a totes les localitats, assolint increments mitjans d'un 14% ($\pm 5.8\%$) i un 18% ($\pm 6\%$) per al període de 1960 al 1999, respectivament. Amb l'increment de c_a , la ratio c_i/c_a es mantingué més o menys constant, donant lloc a un augment en W_i . Ni l'increment en la temperatura, ni la davallada en les precipitacions, ni l'augment en el dèficit de pressió de vapor (VPD) detectats durant l'hivern semblen ser responsables de l'increment en W_i observat a totes les localitats durant el període 1960-99. Els resultats apunten cap al c_a com a principal força conductora de la millora en W_i observada durant el citat període.

CAPÍTOL 3

Aquest article mostra les cronologies de gruix i $\delta^{13}\text{C}$ de cinc pinedes ibèriques i la seva sensibilitat al clima. Es va trobar una major i més homogènia concordança entre els registres d'isòtops de carboni que entre les sèries de gruix dels anells, resultat que suggereix que les ràtios de $\delta^{13}\text{C}$ podrien estar enregistrant preferentment senyals climàtics a gran escala, mentre que les variacions en el gruix dels anells estarien reflectint factors més locals. Va ser trobada una relació negativa entre el gruix dels anells i el $\delta^{13}\text{C}$. A partir dels anàlisis de funció resposta es va determinar que els gruixos dels anells i el $\delta^{13}\text{C}$ mostraren relacions significatives amb el clima. Les diferents localitats i espècies revelaren una resposta a la temperatura estival i a la precipitació no uniforme en el creixement, mentre que totes les sèries de $\delta^{13}\text{C}$ eren altament sensibles a les precipitacions de l'estiu i en menor mesura, a la temperatura estival. Així doncs, els valors de $\delta^{13}\text{C}$ reflectiren el senyal d'estrès per sequera durant la temporada d'estiu millor que els gruixos dels anells dels arbres. Aquest resultat demostra que les ràtios isotòpiques poden ser una eina útil per a les reconstruccions climàtiques quan les relacions entre el clima i el gruix dels anells són dèbils. Comparacions amb altres estudis revelen una gran influència de les condicions locals en les ràtios de $\delta^{13}\text{C}$. No obstant, una forta senyal de precipitació sembla està reflectida en la cel·lulosa dels arbres que creixen en climes mediterranis.

CAPÍTOL 4

Es van realitzar reconstruccions de les precipitacions de Juny-Juliol (P0607) a Espanya des del 1600 AC utilitzant cronologies d'anells dels arbres de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ establertes a tres localitats diferents. El $\delta^{13}\text{C}$ de la cel·lulosa dels anells fou analitzat mitjançant dues metodologies diferents, combustió i piròlisi, obtenint així dues cronologies de $\delta^{13}\text{C}$ per cada localitat. Es van realitzar anàlisis de components principals (PCA) utilitzant combinacions de cronologies d'anells dels arbres, obtenint diferents grups de *proxies* formats per components principals (PCs). P0607 es va extreure de dos grups diferents de dades meteorològiques: del *Instituto Nacional de Meteorologia* (INM) i de la *Climatic Research Unit* (CRU). Les millors correlacions del període de calibració es van assolir combinant els dos tipus sèries dels anells dels arbres. Així doncs, les funcions de transferència utilitzades per estimar P0607 INM o P0607 CRU eren regressions múltiples *stepwise* basades en tres grups diferents de *proxies*: (a) sèries estàndard de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$; (b) sèries estàndard de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ sense autocorrelació; (c) sèries estàndard de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ amb decalatges temporals. Es van trobar similituds molt fortes entre les reconstruccions del INM i del CRU, malgrat que les coincidències eren menors entre les dues reconstruccions basades en sèries de $\delta^{13}\text{C}$ sense autocorrelació, i encara menors quan es feien servir *proxies* amb decalatges temporals. Les reconstruccions basades en dades del INM eren més semblants entre ells que les basades en dades del CRU. La inestabilitat detectada entre les variables dels anells dels arbres i el clima, així com discrepàncies entre les reconstruccions respecte a les baixes freqüències, van introduir algunes qüestions sobre la fiabilitat de les nostres reconstruccions. Malgrat això, les similituds trobades amb diverses reconstruccions basades en fonts històriques documentals durant els segles 17th i 18th van validar d'alguna manera els nostres resultats. A més, relacions significatives entre les nostres reconstruccions i els índexs NAO i SOI mostraren un lligam entre les nostres sèries i fenòmens de circulació atmosfèrica general, així com la seva influència en la precipitació de la Península Ibèrica.

DISCUSSIÓ

1. EFECTES DEL CLIMA I DE LA CONCENTRACIÓ DEL CO₂ ATMOSFÈRIC EN PINEDES IBÈRIQUES

Alguns dels efectes més coneguts englobats en l'actual canvi climàtic global, l'increment en la temperatura mitjana i en la concentració del CO₂ atmosfèric, poden tenir efectes oposats sobre les plantes. Augments en la concentració del CO₂ atmosfèric poden aportar un major substrat per la fotosíntesi, conduint a un major creixement. En contra, els increments de temperatura poden incrementar la taxa respiratòria, portant a una reducció del creixement. Els estudis fets fins al moment apunten en direccions diferents. Per exemple, una estimulació en la producció primària neta en quatre experiments d'enriquiment de CO₂ realitzats en boscos a l'aire lliure (Norby *et al.* 2005) o una desacceleració del creixement en boscos tropicals (Feely *et al.* 2007). Malgrat això, encara hi ha molt preguntes que romanen sense resposta relacionades amb la partició i la retenció del carboni. En climes mediterranis, l'increment en la concentració del CO₂ atmosfèric pot tenir efectes fertilitzants només si la temperatura i les precipitacions no es troben limitant el creixement mitjançant una manca en la disponibilitat d'aigua. Aquest és només un exemple per deixar de manifest que, encara que s'han fet nombroses simulacions d'escenaris futurs (Sabaté *et al.* 2002; Bakkenes *et al.* 2002; Thuiller *et al.* 2003), els efectes del canvi climàtic en els ecosistemes terrestres són difícils de predir, sent a més molt heterogenis en tot el món (Chapin *et al.* 2000; Walther *et al.* 2002; Root *et al.* 2003; Parmesan 2006).

Els anells dels arbres han estat àmpliament utilitzats per avaluar els efectes del recent canvi climàtic i mediambiental sobre els ecosistemes forestals (Fritts 1976), degut a la capacitat que tenen els arbres d'enregistrar informació del clima i les condicions de CO₂ en les seves capes de creixement anual o anells. Utilitzant dos variables diferents dels anells, el gruix i la signatura del $\delta^{13}\text{C}$, hem observat canvis en la variabilitat del creixement dels arbres entre trenta-vuit boscos durant el segle XX (*Capítol 1*) i en la eficiència en l'ús de l'aigua (W_i) en cinc rodals seleccionats (*Capítol 2*), respectivament. El primer canvi estava relacionat amb un increment en la temperatura mitjana i la variabilitat climàtica, mentre que el segon canvi estava lligat al augment de la concentració del CO₂ atmosfèric.

1.1. Efectes del clima

A més de l'escalfament global degut als gasos d'efecte hivernacle (Mann *et al.* 1998; Crowley 2000; IPCC 2001a; IPCC 2007a), especialment durant les darreres dècades, la comunitat científica està reconeixent cada cop més que les variacions a curt i llarg termini en les variacions climàtiques naturals estan intrínsecament lligades amb el canvi climàtic. En aquest aspecte, s'espera condicions climàtiques més limitants a gran escala, i en conseqüència una major sincronia en el creixement dels arbres entre diferents boscos.

CAPÍTOL 1: Efectes del clima en la variabilitat regional del creixement dels arbres

Canvis en els patrons de creixement

Una xarxa de trenta-vuit cronologies de gruix d'anells dels arbres, formada per tres espècies diferents, es va establir en localitats amb diferents característiques i sota influències climàtiques diferents al llarg del nord i l'est de la Península Ibèrica. Malgrat l'ampli ventall de boscos, un percentatge estadísticament significatiu de variància comú era compartida per totes les cronologies (capítol "cap."1 Fig. 2). A una major escala, aquesta variabilitat comú podria ser deguda al clima, ja que el macroclima sembla ser l'únic factor fiable que pot tenir una influència en totes les localitats al llarg de la Península. No obstant això, aquesta variància comú que les cronologies compartien no era estable en el temps, i mostrava un clar increment al començament de la segona meitat del segle XX (cap. 1 Fig. 3). Tenint en compte que les similituds entre cronologies haurien d'augmentar sota condicions climàtiques més limitants (Tardif *et al.* 2003), aquesta major variància comú indicaria que els boscos estudiats creixien de forma més sincrònica durant aquest segona meitat del segle XX. De la mateixa manera, la freqüència d'anells estrets (cap.1 Fig. 4) i la variabilitat interanual en el creixement (cap. 1 Fig 5a) també van augmentar al llarg del segle XX.

Canvis en la resposta climàtica

Es van establir relacions significatives entre la cronologia regional de l'àrea estudiada i dades meteorològiques espanyoles (cap. 1 Fig 7), indicant que el creixement radial està limitat per l'estrès hídric durant l'estiu previ al creixement, així com l'efecte positiu de les precipitacions de juliol durant l'any de formació de l'anell. No obstant això, es van observar canvis en la resposta climàtica durant el segle XX (cap. 1 Fig 8). Aquests resultats suggerien una extensió del període d'estrès hídric de l'estiu a finals d'estiu, així com un enfortiment de la relació entre el creixement i les temperatures

de les acaballes d'estiu i tardor de l'any anterior al creixement. El creixement dels arbres va incrementar la correlació negativa amb la temperatura prèvia d'agost i setembre i la correlació positiva amb la temperatura de novembre, assolint valors significatius al voltant de 1949. Cal destacar que aquest canvi en la resposta climàtica es produí simultàniament al canvi en el patró de creixement dels arbres descrit anteriorment, indicant un increment dels efectes de l'estrès hídric en el creixement radial durant la segona meitat del segle XX. Conclusions similars han estat reportades per altres autors (Tardif *et al.* 2003; Macias *et al.* 2006; Wilmking *et al.* 2004).

Coincidències entre els patrons de creixement i les tendències climàtiques

Com ja s'ha esmentat anteriorment, les temperatures de finals d'estiu prèvies al període de creixement poden ser un dels conductors climàtics del canvi observat en el patró de creixement entre els boscos de la Península Ibèrica. D'acord amb això, la tendència creixent en la temperatura mitjana mensual observada a la segona meitat del segle XX (cap. 1 Fig. 6) podria estar potenciant l'estrès hídric a finals de l'estiu anterior al creixement. La variabilitat en les precipitacions durant el període de creixement presentava una tendència a l'alça al llarg del segle XX (cap.1 Fig. 5b), fet que podria estar induint un increment de la variació comú en el creixement dels boscos (cap. 1 Fig. 3), així com en la variabilitat del creixement dels arbres (cap. 1 Fig. 4; Fig. 5a). D'acord amb això, la variabilitat de les precipitacions fou negativament relacionada amb el creixement, però positivament amb la variabilitat en el creixement dels arbres (cap. 1 Fig. 9).

Així doncs, al menys dos factors climàtics poden haver estat afectant el creixement dels arbres i conduint els canvis en els patrons de creixement i en la resposta climàtica observats durant la segona meitat del segle XX: l'augment observat en les temperatures mitjanes i l'increment detectat en la variabilitat de les precipitacions durant el període de creixement. Aquests resultats es troben en consonància amb l'escalfament (IPCC 2001b; Giorgi *et al.* 2004) i l'increment de la variabilitat climàtica (Font Tullot 1988; Romero *et al.* 1998; De Luis *et al.* 2000) descrits a Espanya.

El clima sembla ser la causa principal dels canvis en els patrons de creixement de tres espècies diferents detectats a la Península Ibèrica, ja que com apunten Parmesan i Yohe (2003), les explicacions no climàtiques perden importància quan l'escala espacial o el nombre d'espècies augmenta. Les condicions climàtiques han esdevingut més limitants pel creixement des de mitjans del segle XX, tal i com suggereix l'augment de

sincronia en el creixement detectat entre els boscos estudiats. La variabilitat climàtica anual també va augmentar, tal i com il·lustren la major sensibilitat i els índexs extrems de creixement registrats pels arbres. És de particular interès, el fet que les trenta-vuit cronologies no fossin seleccionades per amplificar el senyal climàtic. Malgrat que la xarxa de cronologies va ser construïda amb tres espècies de pins diferents, i amb una gran varietat d'habitats respecte a les condicions locals i influències climàtiques al llarg del nord i est de la Península Ibèrica, totes elles compartien un percentatge significatiu de variància comú (32.5%).

La contribució principal del *Capítol 1* és aportar noves evidències dels efectes que el canvi climàtic global està produint en els ecosistemes terrestres, afegint informació nova sobre les respostes de les pinedes ibèriques a aquestes condicions climàtiques canviants. Les investigacions a localitats específiques són importants per entendre l'ampli ventall de respostes observat als sistemes biològics, així com per assolir un millor coneixement de les conseqüències que el canvi climàtic pot produir al món. A més, tenint en compte que s'han predit efectes més forts del canvi climàtic per al sud d'Europa que per regions més temperades (IPCC 2007b), estudis en regions com la Península Ibèrica, que ja són vulnerables degut a la seva variabilitat climàtica intrínseca i on moltes espècies troben el seu límit de distribució fitogeogràfica (Blanco *et al.* 1997), són encara més necessaris.

Els resultats obtinguts també són rellevants perquè existeix una manca d'estudis on s'analitzin canvis en la variabilitat tal i com hem fet aquí. Els canvis en les mitjanes del clima solen estar acompanyats per canvis a curt termini (per exemple, interanuals o interdecadals) en la variabilitat. La relació entre la mitjana del clima i la variabilitat climàtica no ha estat investigada exhaustivament, malgrat que els impactes del canvi climàtic en els sistemes de la Terra poden derivar més dels canvis en la variabilitat que en la mitjana (Kutzbach *et al.* 2001). A més, l'augment en la variabilitat pot ser especialment crític en regions amb un clima altament variable com el Mediterrani. Així doncs, entre les contribucions més importants del *Capítol 1* està la validació de la importància de considerar el paper de la variabilitat climàtica en estudis relacionats amb els canvis biològics.

Reconstruccions climàtiques

Finalment, l'estabilitat de la relació significativa entre les precipitacions de juliol i el creixement, introdueix la possibilitat de reconstruccions realistes de les precipitacions estivals a la Península Ibèrica utilitzant una xarxa de cronologies de gruix d'anells. No obstant això, s'ha de tenir una especial precaució amb les reconstruccions de les temperatures degut a la inestabilitat de la seva relació amb el creixement. De forma similar, altres autors també han apuntat que algunes reconstruccions climàtiques basades en el gruix dels anells poden subestimar el clima del passat (Wilmking *et al.* 2004; Tardif *et al.* 2003).

La manca de disponibilitat d'aigua durant la temporada d'estiu, així com l'estabilitat de la relació trobada entre les precipitacions de juliol i el creixement regional representat per la xarxa de cronologies de gruix, senyalen a la Península Ibèrica com a un lloc idoni per a dur a terme reconstruccions de les precipitacions de l'estiu. D'acord amb això, el *Capítol 4* presenta diverses reconstruccions preliminar de les precipitacions estivals a Espanya pels darrers 400 anys. Donat que alguns autors han destacat l'enorme potencial de combinar diferents *proxies* dels anells dels arbres (McCarroll *et al.* 2003; Gagen *et al.* 2006), mesures del $\delta^{13}\text{C}$ es van utilitzar addicionalment al paràmetre clàssic de gruix de l'anell per tal de millorar la fiabilitat de les reconstruccions.

1.2. Efectes de la concentració del CO₂ atmosfèric

Més enllà de l'efecte directe del CO₂ com a conductor clau del canvi climàtic, l'increment de la concentració del CO₂ atmosfèric juga un paper important en la fisiologia dels arbres. Nivells elevats de CO₂ poden produir un efecte fertilitzant durant el procés de fotosíntesi i portar a un augment en les taxes de creixement. Al mateix temps, alts nivells de CO₂ poden conduir a una reducció de l'obertura estomàtica. Aquesta situació podria contrarestar els efectes de l'increment en les temperatures, ja que les altes temperatures escalfen la superfície de les fulles, i en conseqüència els estomes han d'estar més oberts per a refrigerar-les. Emperò, una disminució en la humitat relativa de l'aire, lligat a un increment de la temperatura i/o una davallada de les precipitacions, pot reduir la conductància dels estomes, potenciant també l'eficiència en l'ús de l'aigua. Totes aquestes reaccions representen una gran avantatja pels arbres per a enfrontar l'estrès ambiental, com per exemple la sequera estival del clima Mediterrani.

No obstant això, com els arbres i les plantes estan responnent i respondran a una atmosfera enriquida en CO₂ és encara una pregunta oberta en molts aspectes. Considerant que la mida dels arbres imposa limitacions òbvies per a estudis fisiològics experimentals, les aplicacions de les tècniques d'isòtops estables han aportat noves aproximacions a l'estudi de la fisiologia dels arbres. Els arbres poden registrar canvis en la composició isotòpica del CO₂ de l'atmosfera en els seus anells amb una resolució anual i estacional, permetent assolir llargs registres d'aquesta variable ambiental.

CAPÍTOL 2: Efectes del la concentració del CO₂ atmosfèric en cinc pinedes espanyoles

Factors que afecten als valors de Δ

Utilitzant les signatures dels isòtops de carboni ($\delta^{13}\text{C}$) de la cel·lulosa dels anells dels arbres, es va analitzar l'efecte de la concentració del CO₂ atmosfèric (c_a) en cinc rodals de pinedes de tres espècies diferents (cap. 2 Fig. 1) per als darrers 200 anys. Es van trobar diferències significatives entre els valors de discriminació (Δ) de les cronologies probablement degut a les diferents condicions de les localitats i/o a diferències específiques: els valors més baixos de Δ pertanyien a la localitat més seca i meridional i també es van trobar diferències en els nivells de Δ entre dos boscos d'espècies diferents separats només per 10 km (cap. 2 Fig. 4a).

La davallada en el $\delta^{13}\text{C}$ i l'estabilitat en la c_i/c_a ($\approx\Delta$)

Totes les cronologies brutes de $\delta^{13}\text{C}$ mostraren una tendència decreixen, particular a cada rodal i més pronunciada des de 1960 (cap. 2 Fig. 4a), similar a la baixada del $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂ atmosfèric causada per la pujada del CO₂ empobrit en ¹³C degut a l'ús de combustibles fòssils i a la desforestació des de la revolució industrial (cap. 2 Fig. 5a)

La ràtio c_i/c_a ($\approx\Delta$) romangué constant des del 1800 fins al període de 1960 al 1999, on una elevada variabilitat en la ràtio c_i/c_a de les cronologies va ser detectada (cap. 2: Fig. 4b; Fig. 5b:). Emperò, d'acord amb els escenaris presentats per Saurer *et al.* (2004), com també es van detectar increments en c_i (concentració de CO₂ intercel·lular a la fulla) i en W_i (eficiència en l'ús de l'aigua) (cap. 2: Fig. 4c-d; Fig. 5c-d), els nostres resultats suggereixen un mecanisme que manté la c_i/c_a més o menys estable, que ha de ser entès com una adaptació reguladora dels arbres a l'augment del CO₂ (Ehleringer i Cerling 1995). La constància en la ràtio c_i/c_a es pot assolir mitjançant una reducció simultània de ambdós, la conductivitat estomàtica i la capacitat fotosintètica en resposta a concentracions més altes de CO₂ (Saurer *et al.* 2004). La reduïda conductivitat pot produir una contribució a l'escalfament

global de les temperatures terrestres mitjançant una reducció de la fracció evaporativa.

La millora en W_i no estava relacionada amb les tendències climàtiques

Amb l'increment de c_a , la ràtio c_i/c_a es mantingué més o menys constant, resultant en un augment significatiu de W_i des de 1960 en totes les localitats estudiades (cap. 2 Fig. 4d; Fig. 5d). Però era realment l'increment de c_a qui potenciava el W_i ? L'augment de temperatura, la baixada de precipitacions i l'increment del dèficit de pressió de vapor observats durant l'hivern (cap. 2 Fig. 6) no semblaven relacionats amb els canvis observats. A més, aquestes tendències climàtiques no es desenvolupaven de la mateixa manera a totes les localitats, suggerint que aquells factors no podien ser els responsables de la potenciació de W_i observada en els cinc boscos estudiats. Així doncs, aquests resultats assenyalen fortament a l'increment de c_a com el conductor més factible de la millora observada en W_i durant a les acaballes del segle XX.

Els arbres sota les condicions del clima Mediterrani han d'afrontar un balanç entre la conductivitat dels estomes i l'escalfament de les fulles per tal d'estalviar aigua i mantenir la fulla refrigerada. Al nostre estudi, s'ha detectat una potenciació de W_i en resposta a nivells més alts de CO_2 , ja que la ràtio c_i/c_a ($\approx \Delta$) romangué més o menys constant. Com la constància de la ràtio c_i/c_a depèn d'una reducció simultània de la conductivitat dels estomes i de la capacitat fotosintètica (Saurer *et al.* 2004), vam assumir que s'havia produït una reducció en la transpiració de les plantes als cinc rodals estudiats. La reducció en la transpiració de les plantes pot afectar als balanços hídrics, resultant en un aire més sec i un major escalfament a prop de les superfícies (Betts *et al.* 2000). Tot i que les conseqüències d'una menor conductància són més importants en àrees més continentals (per exemple, Sibèria), on una gran part de les precipitacions es generen gràcies a la transpiració (Saurer *et al.* 2004), la resposta fisiològica observada als boscos espanyols podria provocar un *feedback* vegetació-clima tot modificant els fluxos d'energia i humitat entre la superfície i l'atmosfera. Fins a quin punt la reducció en la transpiració de les plantes contrarestarà l'augment d'estrès hídric? Roman sense esclarir fins a quin punt i fins quan de temps es podrà mantenir la reducció en la transpiració de les plantes si, com s'ha descrit al *Capítol 1*, les temperatures estan pujant i les precipitacions s'estan tornant més irregulars a la Península Ibèrica, de manera que les plantes necessitaran obrir els estomes per refrigerar les fulles.

Encara que s'ha de tenir en compte que els nostres resultats són només estimacions del W_i (no hem mesurat el W_i real al camp), les tendències observades pels darrers dos segles es poden considerar rellevants, ja que aquest tipus de registres llargs només es poden aconseguir d'aquesta manera. Així doncs, la discriminació d'isòtops de carboni analitzada mitjançant els anells dels arbres proporciona una mesura de W_i i també un registre històric de les respostes dels arbres a les condicions ambientals.

Comparant amb els resultats del *Capítol 1*, on el clima es relacionava amb els canvis observats en els patrons de creixement dels arbres, els resultats del *Capítol 2* mostren que el clima no està conduint les tendències observades en W_i , sent l'increment en la concentració del CO_2 atmosfèric la principal causa. No obstant això, els dos estudis tenen en comú que els canvis més forts foren observats a la segona meitat del segle XX, incorporant més evidències dels impactes del canvi climàtic a la Península Ibèrica i destacant la complexitat en les respostes dels sistemes biològics.

2. RECONSTRUCCIONS CLIMÀTIQUES A ESPANYA

2.1. Sensibilitat del gruix i del $\delta^{13}C$ al clima

El segon objectiu principal d'aquesta Tesi es extreure el senyal climàtic registrat pels boscos estudiats amb la intenció de reconstruir el clima del passat. Utilitzant els mateixos rodals que en el *Capítol 2*, la naturalesa i la força del senyal climàtic registrat per aquestes cinc pinedes ibèriques (cap. 3 Fig. 1) es va avaluar al *Capítol 3*. En aquest cas, tant les cronologies de gruix com les de $\delta^{13}C$ van ser analitzades, ja que hi havia un gran interès en comparar la sensibilitat climàtica d'ambdós tipus de variables dels anells dels arbres.

CAPÍTOL 3: Sensibilitat al clima del gruix i del $\delta^{13}C$ dels anells dels arbres en pinedes espanyoles

Comparació entre el gruix i el $\delta^{13}C$

Es va trobar una major i més homogènia semblança en resposta al clima entre els registres d'isòtops de carboni que entre les sèries de gruix dels anells. En un domini de freqüència similar, les correlacions entre les cronologies de $\delta^{13}C$ eren més altes que entre les sèries de gruix (cap. 3: Taula 4; Taula 5). D'acord amb això, la variància explicada pel PC1 mostrarà que les variacions

en $\delta^{13}\text{C}$ a localitats diferents presentaven més similituds que les variacions en el gruix dels anells (cap. 3 Taula 6). La mateixa troballa la va reportar Saurer *et al.* (1995).

Els nostres resultats també assenyalen que la variable del gruix dels anells podria reflectir factors locals, mentre que les ràtios del $\delta^{13}\text{C}$ podrien contenir un senyal climàtic més ampli en l'espai. D'acord amb això, Gagen *et al.* (2004) van trobar que les sèries de $\delta^{13}\text{C}$ eren molt menys sensibles a les condicions locals que les variables de creixement, mentre que els estudis de Robertson *et al.* (1997a, b) també demostraren que les mesures isotòpiques contenien senyals climàtics més significatius que no pas el gruix dels anells.

Les correlacions (cap. 3 Taula 7) i els PCs (cap. 3 Fig. 4) revelaven una relació negativa entre els valors de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ dels anells (cap. 3 Fig. 4). Tot i que la variabilitat interanual dels dos paràmetres estava relacionada amb les variacions climàtiques, la mateixa variable climàtica pot tenir efectes oposats en ells.

Sensibilitat climàtica

Com es pot inferir dels anàlisis de funció resposta, tant el gruix dels anells com el $\delta^{13}\text{C}$ mostraren relacions significatives amb el clima. Cada cronologia de gruix mostrava la seva particular relació amb el clima d'acord amb la varietat de característiques dels rodals i les condicions climàtiques locals (cap. 3 Fig. 5). En contraposició, una resposta negativa comú a les precipitacions de l'estiu, així com una resposta positiva a la temperatura estival (en menor mesura) era compartida per totes les cronologies de $\delta^{13}\text{C}$ (cap. 3 Fig. 6). El fet que haguem trobat una forta dependència entre el $\delta^{13}\text{C}$ dels anells i la disponibilitat de l'aigua, com un fort i consistent control climàtic comú a tots els rodals estudiats, es troba en concordança amb el senyal climàtic extens i homogeni compartit per les cronologies de $\delta^{13}\text{C}$. Així doncs, els valors de $\delta^{13}\text{C}$ reflecteixen el senyal d'estrès per sequera durant la temporada d'estiu millor que els gruixos d'anells, deixant de manifest que $\delta^{13}\text{C}$ és un valuós integrador de la disponibilitat d'aigua. Això destaca les ràtios isotòpiques com una eina útil per a les reconstruccions climàtiques quan les relacions entre el clima i el gruix dels anells són febles.

Les comparacions amb altres treballs revelen un fort senyal de les precipitacions en el $\delta^{13}\text{C}$ de la cel·lulosa dels arbres en els climes mediterranis (Feng i Epstein 1995; Swanborough *et al.* 2003; Ferrio i Voltas 2005), però també una elevada influència de les condicions locals en les ràtios de $\delta^{13}\text{C}$ (Saurer *et al.* 1995; Treydte *et al.* 2001; Gagen *et al.* 2004).

Un dels principis fonamentals de la dendrocronologia, la assumpció de que la informació comú compartida entre els arbres d'un rodal pot ser considerada informació climàtica (Cook i Briffa 1990), es va extrapolar i usar a una escala més àmplia en el *Capítol 1* i en el *Capítol 3*. Això es va fer considerant que la variabilitat comú compartida per les trenta-vuit cronologies de gruix dels anells dels arbres de les tres espècies diferents (*Capítol 1*), per les cinc cronologies de gruix o per les cinc de $\delta^{13}\text{C}$ (*Capítol 3*) a la Península Ibèrica havia de ser deguda al clima.

Un model simple de la influència de la concentració interna de CO_2 a les cambres dels estomes (McCarroll i Pawellek 2001) descriu que els valors de $\delta^{13}\text{C}$ indicaven el balanç entre la conductivitat dels estomes (en relació a la humitat relativa de l'aire i precipitacions prèvies) i la taxa fotosintètica (en relació a la temperatura i el flux de fotons). Així doncs, la sensibilitat a la precipitació i la temperatura (en relació a la humitat relativa) descrites en el *Capítol 3*, suggereixen que la variabilitat de $\delta^{13}\text{C}$ es trobava principalment controlada per la conductivitat estomàtica a totes les localitats estudiades (tot i que la temperatura podia estar afectant també la taxa fotosintètica). Les troballes del *Capítol 2* relacionaven una reducció de la conductivitat dels estomes amb altres canvis fisiològics de les plantes com l'estabilitat en c_i/c_a i l'augment del valor de W_i , com a conseqüència de l'increment de la concentració del CO_2 atmosfèric. Tenint en compte que els objectius d'aquests articles no eren els mateixos, es van aplicar metodologies diferent als dos capítols, retenint només les baixes freqüències de les sèries al *Capítol 2*, i les fluctuacions de més altes freqüències al *Capítol 3*. D'acord amb els nostres resultats, a la literatura, les variacions de baixa freqüència en les sèries d'anells de $\delta^{13}\text{C}$ des de finals del segle XIX i durant el segle XX han estat relacionades amb respostes fisiològiques a l'increment en la concentració de CO_2 atmosfèric lligat a la davallada del $\delta^{13}\text{C}$ atmosfèric (e.g. Feng 1998), mentre que les fluctuacions d'alta freqüència en $\delta^{13}\text{C}$ han estat relacionades amb paràmetres climàtics (Feng i Epstein 1995; Hemming *et al.* 1998; Tang *et al.* 1999). Així doncs, canvis en factors com la concentració de CO_2 atmosfèric, la temperatura, les precipitacions, la humitat relativa o el flux de fotons tenen un efecte sobre les ràtios de $\delta^{13}\text{C}$, sent els isòtops estables del carboni un indicador molt útil per reconstruir aquestes diferents condicions ambientals en el passat. Malgrat tot, un dels majors reptes per a la comunitat científica és ser capaços de separar els senyals climàtics d'aquests altres factors.

2.2. Reconstrucció de la precipitació d'estiu

Considerant que el *Capítol 3* va demostrar una sensibilitat climàtica significativa de les variables dels anells com són el gruix i el $\delta^{13}\text{C}$, vam decidir efectuar una reconstrucció climàtica pels darrers 400 anys utilitzant les tres cronologies més llargues de les localitats estudiades. La disponibilitat d'aigua durant l'estiu va ser el factor limitant pel creixement més important segons els resultats obtinguts en el *Capítol 3*. D'acord amb això, les calibracions preliminars fetes mensualment (12 variables) i amb agrupacions d'aquestes dades meteorològiques (66 combinacions) per la temperatura mitjana i la precipitació total, també van trobar que la precipitació de Juny-Juliol era una de les variables més adequades per ser reconstruïda en el *Capítol 4*. D'altra banda, les correlacions obtingudes utilitzant les combinacions de les variables de temperatura eren més baixes.

Dos grups diferents de dades meteorològiques es van utilitzar depenent dels capítols d'aquesta Tesi. La temperatura mitjana i la precipitació total mensuals a Espanya de la base de dades TYN CY 1.1 (Mitchell *et al.* 2003) creada per la *Climatic Research Unit* (CRU) va ser utilitzada al *Capítol 1* perquè la detecció del senyal macroclimàtic registrat en la xarxa de cronologies de gruix dels anells dels arbres era un dels principals objectius d'aquell article. D'altra banda, les dades corresponents al punt més pròxim a cada localitat de la base de dades espanyola en forma de malla (25 x 25 Km mida de la malla de la malla) creada per el *Instituto Nacional de Meteorologia* (INM) van ser utilitzades en el *Capítol 2* i el *Capítol 3* perquè aquells articles estaven centrats en respostes més locals al clima. Finalment, les dues bases de dades meteorològiques es van utilitzar en el *Capítol 4* per dur a terme comparacions entre aquestes dues fonts de dades instrumentals. Considerant que l'objectiu principal era reconstruir les precipitacions estivals a escala regional, es va fer un anàlisi de components principals (PCA) amb els 3 punts de la malla de la base de dades del INM per tal d'obtenir una estima regional del clima a Espanya. Així doncs, algunes diferències entre les reconstruccions basades en aquests dos grups de dades eren previsible donat que no representen exactament el mateix.

CAPÍTOL 4: Reconstruccions de la precipitació pels darrers 400 anys a Espanya

Reconstruccions de les precipitacions estivals

Reconstruccions de la precipitació de Juny-Juliol (P0607) a Espanya es van fer fins a 1600 AC utilitzant cronologies d'anells dels arbres de gruix (cap. 4 Fig. 2) i de $\delta^{13}\text{C}$ (cap. 4 Fig. 3) establertes a tres localitats diferents (cap. 4 Fig. 1). Prèviament a la realització de funcions de transferència, anàlisis de components principals (PCA) es van fer utilitzant diferents combinacions de les cronologies. Com a resultat es van obtenir diferents grups de dades formats per les components principals (PCs). Les millors correlacions en el període de calibració es van aconseguir utilitzant els dos tipus de variables dels anells dels arbres (cap. 4 Fig. 4). Aquests resultats coincideixen amb els de McCarroll *et al.* (2003) i Gagen *et al.* (2006) que van descriure que les correlacions climàtiques s'enforteixen i que el rang de paràmeters que es poden extreure augmenta quan es combinen diferents *proxies*.

Les funcions de transferència utilitzades per estimar la P0607 INM (*Instituto Nacional de Meteorologia*) o la P0607 CRU (*Climatic Research Unit*) van ser unes regressions *stepwise* múltiples fetes a partir de: (a) sèries estàndards de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$; (b) sèries estàndards de gruix i sèries de $\delta^{13}\text{C}$ sense autocorrelació; (c) sèries estàndards de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ amb decalatges temporals. Fortes similituds van ser trobades entre les reconstruccions del INM i del CRU (cap. 4 Fig. 5), malgrat que les similituds disminueixen quan les reconstruccions es basaven en les sèries de $\delta^{13}\text{C}$ sense autocorrelació, i encara eren més diferents quan s'utilitzaven sèries amb decalatges temporals.

Fiabilitat en les reconstruccions de P0607

La inestabilitat detectada entre les variables dels anells dels arbres i el clima, així com discrepàncies entre les reconstruccions respecte a les baixes freqüències, van introduir algunes qüestions sobre la fiabilitat de les nostres reconstruccions. Malgrat això, les similituds trobades amb diverses reconstruccions basades en fonts històriques documentals durant els segles 17th i 18th van validar d'alguna manera els nostres resultats. A més, relacions significatives entre les nostres reconstruccions i els índexs NAO i SOI mostren un lligam entre les nostres sèries i fenòmens de circulació atmosfèrica general. Malgrat això, es van trobar diferències en la magnitud de la seva resposta a la NAO i el ENSO.

Tal i com es va concloure al *Capítol 4*, les discrepàncies trobades en les fluctuacions de baixa freqüència de les nostres reconstruccions, així com en la magnitud de la seva resposta a fenòmens atmosfèrics d'escala global com són la NAO i l'ENSO, alerten de

la necessitat de discutir en profunditat els diferents tractaments estadístics aplicats a les sèries d'anells previ al seu ús per a fer reconstruccions del passat. Aquest tema no és nou en la recerca climàtica, ja que ha estat discutit extensament en relació a les reconstruccions de la temperatura. Grans diferències van ser trobades en el rang d'amplitud entre diverses reconstruccions mil·lenàries d'alta resolució de la temperatura del passat basades en el gruix dels anells o en mesures de densitat (Briffa i Osborn 2002; Esper *et al.* 2004; D'Arrigo *et al.* 2006), malgrat que van ser detectades variacions similars a escales de dècades o de segles després de extreure les seves variacions de baixa freqüència (Esper *et al.* 2004). Malgrat això, encara que l'ús dels isòtops estables redueix els mètodes estadístics d'estandardització normalment aplicats en les cronologies de gruix i densitat (McCarroll i Loader 2004; Gagen *et al.* 2007), les incerteses relacionades amb el rang real d'amplitud de la temperatura o la precipitació del darrer mil·lenni encara romanen sense resoldre. L'assoliment d'aquest repte és crucial per obtenir una millor entesa de les actuals fluctuacions climàtiques, així com per millorar la fiabilitat dels models de predicció climàtica, determinant fins a quin punt el canvi climàtic actual és inusual. En aquesta Tesi, s'han explorat diferents tractaments estadístics, contribuint d'aquesta manera amb resultats nous per tal de resoldre aquest tema.

Les reconstruccions climàtiques amb resolució anual, com per exemple les fetes a partir d'anells dels arbres, juguen un paper important en les investigacions palaeoclimàtiques ja que permeten no només la determinació de períodes freds/càlids o secs/plujosos, sino també la detecció de fenòmens climàtics extrems que van succeir en el passat. En l'actualitat, no moltes reconstruccions basades en cronologies de gruix dels anells dels arbres a la Península Ibèrica han estat publicades (Creus 1991-92, 1995, 1996; Fernández *et al.* 1996; Manrique i Fernández-Cancio 2000), i només Planells *et al.* (2006) van introduir l'ús de cronologies d'anells dels arbres d'isòtops estables com a predictors en les reconstruccions del clima local. En aquest sentit, el nostre intent de reconstruir la precipitació a Espanya utilitzant una combinació de gruix i isòtops estables del carboni és bastant nou.

La aproximació *multiproxy* per a fer reconstruccions climàtiques està sent intensament recomanada com a solució per millorar la validesa de les reconstruccions en el futur, ja que sembla que podria suavitzar els problemes particulars intrínsecs en cada tipus de

proxies (Mann 2002). De fet, diversos autors han combinat recentment diferents tipus de *proxies* per reconstruir les temperatures a Europa pel darrer mil·leni (Guiot *et al.* 2005), les temperatures de l’Hemisferi Nord pels últims 2000 anys (Moberg *et al.* 2005) o la precipitació a Europa pels darrers 500 anys (Pauling *et al.* 2006). El fet que reconstruccions basades en documents històrics o índexs de sequera (Barriendos 1997; Rodrigo *et al.* 1999; Vicente-Serrano i Cuadrat 2007), així com altres *proxies* climàtiques estudiades en sediments de llacs als Pirineus (Pla i Catalan 2005) estiguin actualment disponibles, introdueix la possibilitat d’efectuar aquest tipus d’estudis multidisciplinars en un futur pròxim per a reconstruir les precipitacions i les temperatures a la Península Ibèrica. La situació geogràfica entre climes temperats i tropicals situa a la Península Ibèrica com una zona de transició amb una gran complexitat climàtica. Els ecosistemes situats en zones de transició poden ser considerats ecotons (Lavorel *et al.* 1998) i són especialment sensibles al canvi climàtic. Així doncs, determinar el clima del passat en aquesta regió és important per entendre les dinàmiques generals del clima.

SÍNTESI

1. Efectes del clima i de la concentració del CO₂ atmosfèric

1.1 Efectes del clima

CAPÍTOL 1: Efectes del clima en la variabilitat del creixement regional en pinedes ibèriques

1.1.1. Un senyal macroclimàtic comú, expressat per la primera component principal, va ser detectat en una xarxa de trenta-vuit cronologies de gruix dels anells dels arbres establerta al llarg de nord i est de la Península Ibèrica, malgrat la diversitat d'espècies, habitats i règims climàtics dels boscos estudiats.

1.1.2. La variància en comú de les cronologies no es va mantenir estable al llarg del temps, mostrant un clar increment al començament de la segona meitat del segle XX. De la mateixa manera, la freqüència d'anells estrets i la variabilitat interanual també van pujar al llarg del segle XX.

1.1.3. El creixement radial es trobava limitat per l'estrès hídric durant l'estiu anterior al creixement, així com per la disponibilitat d'aigua durant el Juliol de l'any de formació de l'anell. Canvis en aquesta resposta climàtica van ser observats al llarg del segle XX i es van produir sincrònicament als canvis observats en el patró de creixement, indicant un augment de l'estrès hídric en la segona meitat del segle XX.

1.1.4. Dos factors climàtics podrien haver estat afectant al creixement dels arbres i conduint aquests canvis observats en el patró de creixement i en la seva resposta climàtica durant la segona meitat del segle XX: les tendències creixents de la temperatura mitjana i l'increment en la variabilitat de la precipitació durant el període de creixement.

1.2. Efectes de la concentració del CO₂ atmosfèric

CAPÍTOL 2: Efectes de la concentració del CO₂ atmosfèric en cinc pinedes espanyoles

1.2.1. Diferències significatives entre els valors de discriminació de les cronologies van ser trobades probablement degut a diferències d'habitat o d'espècie.

1.2.2. Totes les cronologies brutes de $\delta^{13}\text{C}$ mostren una tendència decreixent, particular per a cada rodal i més pronunciada des de 1960. Aquesta caiguda és similar a la caiguda del $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂ atmosfèric causat per l'augment de CO₂ empobrit en ¹³C degut a la crema de combustibles fòssils i a la desforestació des de la revolució industrial.

1.2.3. La ràtio de c_i/c_a (\approx discriminació) es mantingué bastant constant amb l'augment en la concentració de CO_2 atmosfèric (c_a), resultant en un increment significatiu en la concentració de CO_2 intercel·lular (c_i) i en l'eficiència en l'ús de l'aigua (W_i) des de 1960 a tots els llocs estudiats.

1.2.4. Ni l'augment en la temperatura, ni la disminució en les precipitacions, ni tampoc l'increment en el dèficit de pressió de vapor (VPD) detectat durant l'època hivernal semblen ser responsables de la millora en W_i .

2. Reconstruccions climàtiques

2.1. Sensibilitat del gruix i del $\delta^{13}\text{C}$ al clima

CAPÍTOL 3: Sensibilitat del gruix i el $\delta^{13}\text{C}$ dels anells dels arbres al clima en pinedes espanyoles

2.1.1. Entre les sèries isotòpiques de carboni va ser trobada una major i més homogènia similitud en resposta al clima que entre les sèries de gruix, suggerint que les ràtios de $\delta^{13}\text{C}$ poden enregistrar una senyal climàtica a una major escala regional, mentre que les variacions en les sèries de gruix reflectiren factors més locals.

2.1.2. Una relació negativa entre els gruix dels anells i els valors de $\delta^{13}\text{C}$ va ser trobada, indicant un relació diferent amb les variables climàtiques.

2.1.3. Els valors de $\delta^{13}\text{C}$ reflectien un senyal d'estrès hídric durant l'estiu major que les sèries de gruix, esdevenint un integrador de la disponibilitat hídrica molt valuós. Aquest fet situa les ràtios isotòpiques com una eina molt útil per les reconstruccions climàtiques quan les relacions entre el clima i el gruix dels anells són dèbils.

2.2. Reconstrucció de la precipitació estival

CAPÍTOL 4: Reconstruccions de la precipitació a Espanya pels darrers 400 anys

2.2.1. Diverses reconstruccions preliminars de la precipitació de Juny-Juliol (P0607) a Espanya basades en cronologies d'anells dels arbres de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ van ser portades a terme pels darrers 400 anys.

2.2.2. Les millors correlacions en el període de calibració es van obtenir utilitzant dos tipus de variables dels anells dels arbres, el gruix i el $\delta^{13}\text{C}$. Les funcions de transferència utilitzades per estimar la P0607 INM (*Instituto Nacional de Meteorologia*) i la P0607 CRU (*Climatic Research Unit*) eren regressions múltiples *stepwise*.

2.2.3. Fortes similituds van ser trobades entre les reconstruccions basades en dades del INM i del CRU, malgrat que aquestes similituds disminuïen entre reconstruccions basades en sèries de $\delta^{13}\text{C}$ sense autocorrelació, i encara disminuïen més quan les sèries utilitzades tenien un decalatge temporal. Les semblances trobades amb diverses reconstruccions històriques documentals durant el segle XVII i XVIII van validar d'alguna manera els nostres resultats.

2.2.4. Les relacions significatives entre les nostres reconstruccions i els índex de la NAO i el SOI mostren un lligam entre les sèries reconstruïdes i els fenòmens atmosfèrics de la NAO i l'ENSO, així com la seva influència sobre la precipitació de la Península Ibèrica.

CONCLUSIONS

- Els canvis observats en la variabilitat del creixement dels arbres d'una xarxa de trenta-vuit cronologies i la seva sensibilitat climàtica (*Capítol 1*), així com un augment en l'eficiència de l'ús de l'aigua en cinc rodals seleccionats (*Capítol 2*) a la Península Ibèrica durant la segona meitat del segle XX són inusuals en relació al passat. Els canvis en el patró de creixement van ser relacionats amb el recent escalfament i amb l'augment en la variabilitat de les precipitacions, mentre que les tendències en l'eficiència de l'ús de l'aigua van ser relacionades amb l'augment de la concentració del CO₂ atmosfèric.
- Els valors de $\delta^{13}\text{C}$ reflecteixen un senyal de l'estrès hídric estival millor que el gruix dels anells en les cronologies d'anells dels arbres de cinc pinedes espanyoles (*Capítol 3*). Es van realitzar reconstruccions de la precipitació estival a Espanya pels darrers 400 anys basades en tres cronologies d'anells dels arbres de gruix i de $\delta^{13}\text{C}$ i es van establir relacions significatives amb fenòmens atmosfèrics com la NAO i l'ENSO (*Capítol 4*). Adicionalment a la ben coneguda aplicació de les tècniques dendrocronològiques per reconstruir el clima del passat, els nostres resultats destaquen l'enorme potencial de combinar diferents variables dels anells dels arbres en la recerca climàtica.

