

ELS BOSCOS IBÈRICS DAVANT DEL CANVI CLIMÀTIC

Carlos Gracia

Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona
CREAF, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, UAB

THE SPANISH FORESTS IN THE FRAME OF CLIMATE CHANGE. The pre-industrial atmospheric CO₂ concentration of 270 ppmv has increased up to the present values of 380 ppmv and, very likely, it will continue to increase. Consequently, the average temperature of Europe has increased 1°C during the past century. Both atmospheric circulation and rainfall patterns show evident changes. Models predict a decrease of rainfall in South Europe of up to 1% per decade. In this frame of climate change, the crucial question is what role can play forests in sequestering CO₂? Water use efficiency in Mediterranean forests is about 5 mmols of C/mol of H₂O or, in other words, to fix between 2 and 3 g of C, plants have to transpire 1000 g of water (i.e., between 300 and 500 times the weight of the fixed C). Given the role of water as a limiting factor in Mediterranean ecosystems, it is clear that the amount of carbon fixed in Mediterranean-type ecosystems is linked to water availability. Both autotrophic and heterotrophic respiration return to the atmosphere an important proportion of the carbon fixed in photosynthesis. Usually, more than 50% of fixed carbon is returned to the atmosphere through respiration processes. The annual net ecosystem exchange of Mediterranean forests is around 5 tones of CO₂ per hectare, while the human emissions in our country are around 10 tones per habitant and year. In these conditions, the role of forests to mitigate the human emissions is very limited. To compensate man-induced emissions, the forest area in our country must be 10 times the current forest area or around twice the total area of Spain. Our forests are experiencing deep changes. Temperate ecosystems are progressively being replaced by Mediterranean ecosystems as a response to increasing temperatures. The length of the growth period is increasing. A simulation analysis of the length of the growth period in Europe, using the GOTILWA+ forest growth model, shows that the growth period of Mediterranean forests can increase up to 50 days in the present century. Modelling results and field experiments indicate that these new growth conditions in a Mediterranean world with less rainfall will have negative effects on the vegetation survival.

Introducció

La concentració atmosfèrica de diòxid de carboni, el més abundant dels gasos d'efecte hivernacle, ha incrementat des de les 270 ppmv de l'era preindustrial fins a les més de 380 ppmv que es registren en l'actualitat. Lluny de ser un procés estabilitzat, aquest augment segueix una tendència exponencial (fig. 1) i les previsions indiquen que, a finals del segle actual, la concentració de CO₂ atmosfèric assolirà nivells d'entre 650 i 1.215 ppmv (AEMA, 2006). La seva concentració ha aconseguit els valors més elevats dels últims 420.000 anys, període del qual tenim informació contrastable obtinguda a partir de les anàlisis de mostres de gel (Petit et. al., 1999). En conseqüència el planeta s'escalfa. La temperatura de la Terra ha augmentat $0,7 \pm 0,2^\circ\text{C}$ durant l'anterior segle i a Europa aquest augment ha estat de $0,95^\circ\text{C}$ (AEMA, 2006).

Onze dels últims dotze anys (1995-2006) estan entre els més càlids des que tenim registres instrumentals de temperatura en el planeta. L'increment de temperatura des del

període 1850-1899 fins al 2001-2005 ha estat de $0,76^\circ\text{C}$. La temperatura mitjana d'Espanya ha augmentat $1,53^\circ\text{C}$ entre 1971 i el 2000, un valor molt superior als $1,2^\circ\text{C}$ previstos pels

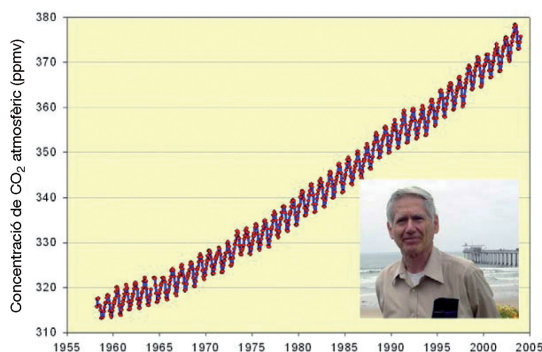


Figura 1. Charles Keeling, de la Universitat de Califòrnia (San Diego), va començar a registrar els nivells de CO₂ al 1958, en un observatori situat al cim del volcà Mauna Loa a Hawaii. El gràfic dels valors mensuals reflecteix que l'activitat de la biosfera genera diferències primavera-hivern de menys de 8 ppmv. Aquest valor ens dona una idea de la capacitat de la biosfera per segrestar CO₂ i representa un lílndar de referència del potencial dels sistemes naturals per actuar com a embornals de CO₂.



models climàtics que prediuen taxes d'increment pròximes als 0,4°C per dècada (Parry *et al.*, 2000), la qual cosa indueix a pensar que el problema, en les nostres latituds, és més greu del que inicialment es va pensar i que podem arribar a mitjan del present segle amb increments de temperatura de 2,5°C i molt probablement, 3,5°C respecte de les del 2000 (Ayala, 2003). Alguns autors han advertit que l'augment de temperatura a Madrid durant l'últim segle i mig, descomptat l'efecte d'illa tèrmica, ha estat un 50% superior a la mitjana de l'hemisferi Nord (Almarza, 2000), en una clara *africanització* del clima peninsular. El

quart meridional del país presenta temperatures mitjanes iguals a les del nord del Marroc de fa un quart de segle i, a mitjan del segle actual, les assolirà la meitat meridional del nostre país.

Aquest augment de temperatura s'associa a canvis importants en el règim de precipitacions. Les tendències de la precipitació anual entre 1900 i 2000 revelen una situació de contrast entre el Nord d'Europa (entre el 10 i el 40% més de precipitació) i el Sud d'Europa (fins a un 20% més seca) amb canvis desigualment repartits al llarg de l'any i més accentuats a l'hivern. Les projeccions indiquen un incre-

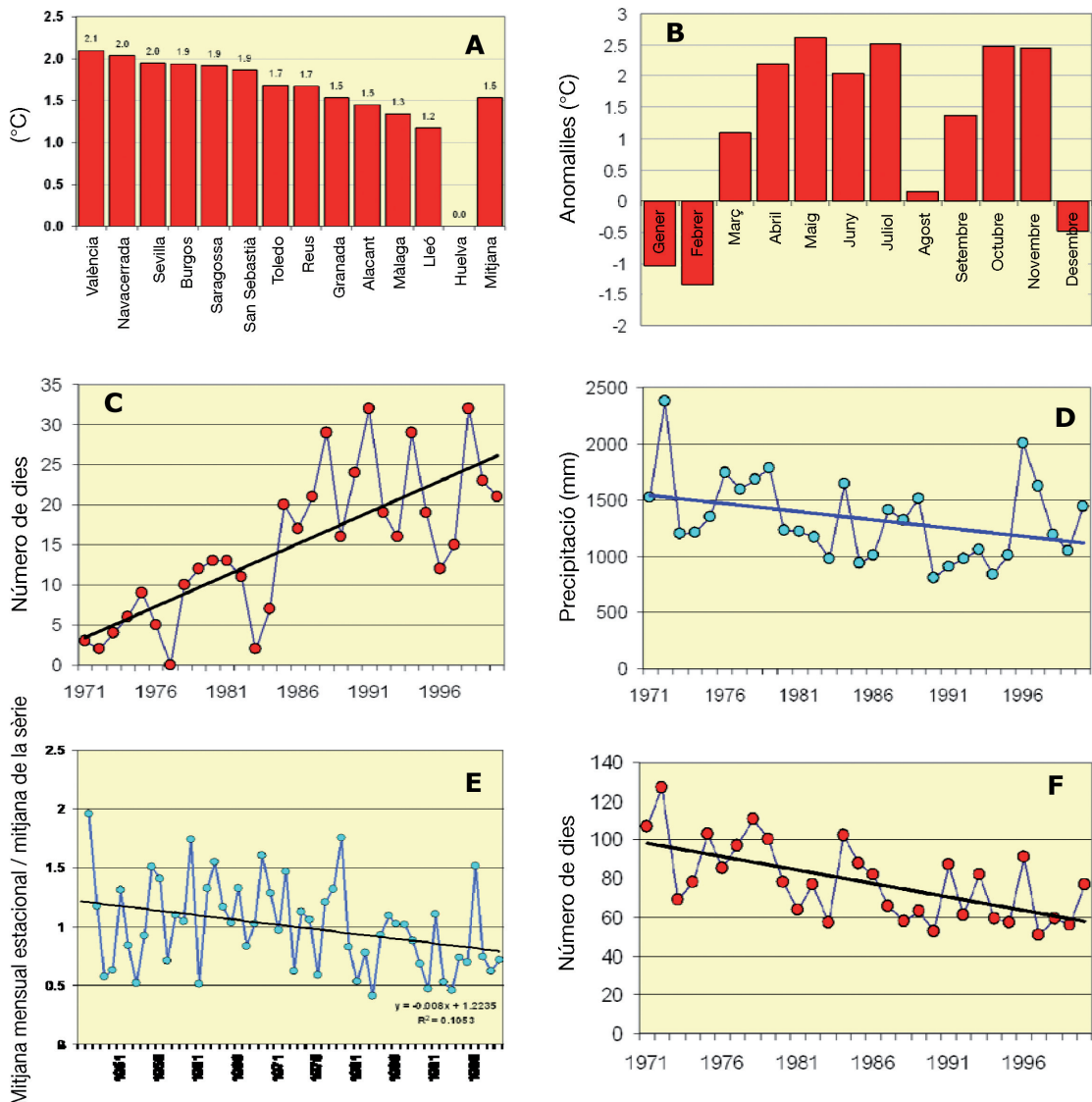


Figura 2. Tendències observades en algunes variables climàtiques en el nostre país. La temperatura mitjana ha incrementat en el període de 1971 al 2000 en 1,5°C de mitjana tot i que aquest increment ha estat desigual en els diferents observatoris tal i com mostra el gràfic A. L'any 2006 ha resultat ser el més càlid de la història a la major part dels observatoris amb anomalies que arriben a superar els 2,5°C (gràfic B). Entre els anys 1971 i 2000 el número de dies amb temperatura superior a 25°C ha augmentat considerablement tal com mostra el gràfic C referit a l'observatori de Navacerrada (Madrid). Paral·lelament, la precipitació mitjana mostra una clara tendència decreixent (D), de la mateixa manera que ho fa la precipitació dels mesos d'hivern (E), alhora que el número de dies amb neu ha minvat un 40% durant el mateix període de temps (F); variables, totes elles, molt importants com a generadores de recursos hídrics. (De Ayala-Carcedo, 2003, 2006)



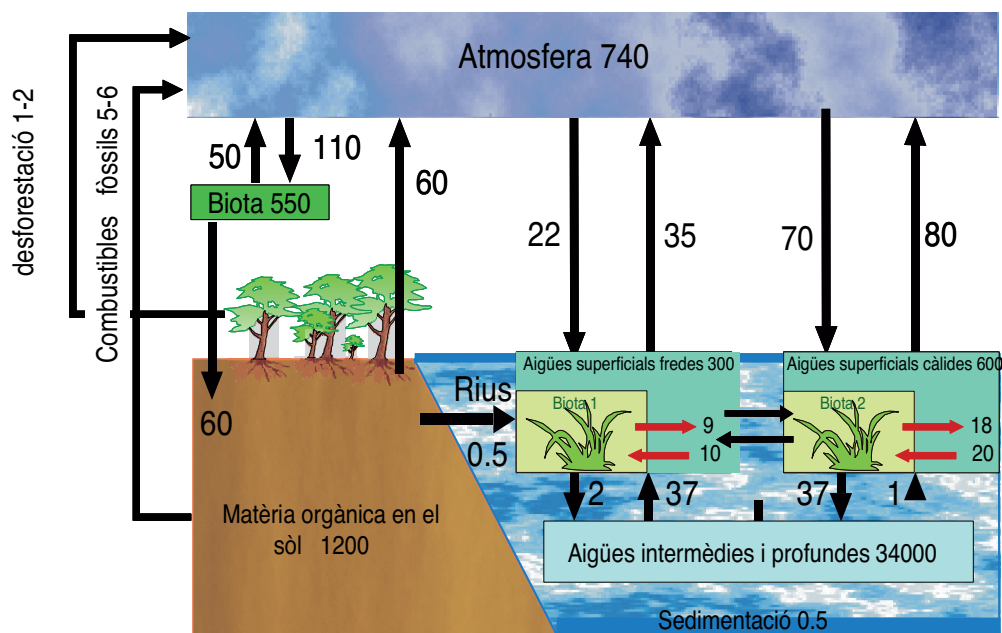


Figura 3. El cicle del carboni en el planeta (tots els valors en 10^{15} g de C o mils de milions de tm de C). Com es pot apreciar, els tres compartiments més importants són, per aquest ordre, els oceans, el sòl i l'atmosfera. La crema de combustibles fòssils suposa unes emissions de C a l'atmosfera d'entre 5 i 6 mil milions de tones anuals als quals hem d'afegir entre 1 i 2 mil milions més com a conseqüència de la desforestació. Aquests dos fluxos, provocats clarament per l'activitat humana, són els responsables de l'increment de la concentració de CO_2 atmosfèric que creix aproximadament un 1 per cent cada any tal i com reflecteix el gràfic de la figura 1.

ment de les precipitacions anuals de l'1 al 2% per dècada en el Nord d'Europa i un descens de fins l'1% per dècada en el Sud tot i que a l'estiu es preveuen descensos de fins al 5% per dècada. Aquesta reducció prevista en el Sud d'Europa pot tenir efectes molt greus com ara l'augment de la freqüència de períodes de sequera que afecten greument l'agricultura i els recursos hídrics.

Les projeccions indiquen que, a finals del segle actual l'increment de temperatura en el planeta serà d'1,4 a 5,8°C i d'entre 2 i 6,3°C a Europa. Una primera conseqüència d'aquest escalfament és la taxa d'augment del nivell del mar. L'augment de temperatura provoca, per una banda, l'expansió tèrmica de l'aigua. S'ha estimat que aquesta expansió ha arribat a valors de 0,42 mm/any entre 1961-2003 i d'1,6 mm/any si considerem el període 1993-2003 solament. Per altra banda, l'escalfament està provocant la fusió de les glaceres i del gel àrtic i antàrtic que, en conjunt han contribuït a l'augment observat del nivell del mar d'1,8 mm/any entre 1961 i 2003, increment que s'ha accentuat en els últims anys. L'augment anual observat entre 1993 i 2003 ha estat de 3,1 mm. En la nostra regió mediterrània, les evidències científiques que s'acumulen dia a dia, posen de manifest una tendència a la reducció de la precipitació i a un augment de la intensitat dels episodis de pluja. Les estimacions més recents preveuen una reducció de la precipitació en la península Ibèrica d'entre el 10 i el 15% durant els pròxims 50 anys.

Una anàlisi de les dades de precipitació a Espanya del *Instituto Nacional de Meteorología* durant el període 1947-1999 (INM; 2002) indica que la tendència de la precipitació hivernal, component principal de la precipitació total i font de generació de recursos hídrics, denota una clara i significativa tendència decreixent. Encara pot afectar més els nostres recursos hídrics el fet que el número de dies de neu decreix en tots els observatoris on s'ha analitzat. A l'observatori de Navacerrada (Madrid) ha disminuït un 40% entre 1970 i 2000. Paral·lelament, el número de dies amb temperatura superior a 25°C ha experimentat un increment en tots els observatoris, el que indica una clara tendència a l'augment d'onades de calor. Com a conseqüència, la taxa d'augment del nivell del mar en el nostre país s'ha multiplicat per tres a la dècada 1990-2000 (3.875 mm/any) respecte a la dècada 1980-1990 (1.345 mm/any), augments superiors als valors mitjans observats a escala mundial.

Les causes més importants s'han de buscar principalment en la desforestació i la crema de combustibles fòssils. Els ecosistemes terrestres acumulen en la seva biomassa uns 550 mil milions de tones de C. Cada any, aquests ecosistemes absorbeixen 110 mil milions de tones de C és a dir, en mitjana, una quantitat equivalent al 20% del carboni acumulat en la seva biomassa.

Tanmateix, aquest carboni absorbit es compensa per la fracció de carboni que retor-



na a l'atmosfera per la respiració autotròfica (50 mil milions de tm de C) i per la descomposició de la fullaraca i altres restes de matèria orgànica que cauen al sòl i que, amb més o menys temps, són descompostos per bacteris i fongs i retornen a l'atmosfera (uns 60 mil milions de tm de C) en el procés conegut com a respiració heterotròfica.

Fins aquí aquests fluxos estan més o menys en equilibri. La crema de combustibles fòssils suposa unes emissions de C a l'atmosfera d'entre 5 i 6 mil milions de tm anuals als quals s'ha d'afegir d'entre 1.000 i 2.000 milions més com a conseqüència de la desforestació. Aquests dos fluxos, provocats clarament per l'activitat humana, són els responsables de l'increment de la concentració de CO₂ atmosfèric que reflecteix el gràfic de la figura 1 i que augmenta actualment a un ritme aproximat de l'1% anual (entre 3 i 4 ppmv anuals)

Les emissions humanes són la causa de l'escalfament global?

El consum d'energia a Espanya és d'uns 130 milions de tones equivalents de petroli. De tota aquesta energia, el 52% s'obté del petroli directament, però un percentatge significatiu (18%) s'obté cremant gas natural i un 20% del carbó. Per fer-ho més comprensible: cada habitant del nostre país crema anualment quelcom més d'11 barrils o, el que és el mateix, 1.800 litres de petroli. Si afegim el consum de la resta de combustibles fòssils i expressem el conjunt, com es fa habitualment, en equivalents de petroli, cada un de nosaltres consumeix anualment l'equivalent a 3.500 l de petroli. Aquest consum significa que, un cop cremat, llencem a l'atmosfera la gens menyspreable quantitat de 10 tones de CO₂ per habitant cada any. A Espanya, el conjunt d'emissions anuals de CO₂ va ser, durant l'any 2004, de 397 mil milions de tones de CO₂ i aquesta xifra incrementa anualment tal com es veu a la figura 4.

A escala mundial les emissions de CO₂ suposen uns 6 mil milions de tones anuals. Aquest increment de CO₂ té un efecte indiscutible sobre l'escalfament del planeta. Ateses les propietats de l'efecte hivernacle d'aquest gas, un increment de la seva concentració a l'atmosfera es tradueix en un increment d'energia neta que queda retinguda en el planeta. És el que es denomina *forçament radiatiu*. El forçament radiatiu del CO₂ ha assolit un valor d'1,66 W m⁻² a causa de l'increment de la concentració atmosfèrica des de les 280 ppmv de l'era preindustrial fins a les 380 ppmv actuals. Ara bé, el CO₂ no és l'únic gas d'efecte hivernacle tot i que també és cert que és quantitativament el més important. El forçament radiatiu degut a l'increment de diòxid de carboni, metà i òxids de nitrogen és, en con-

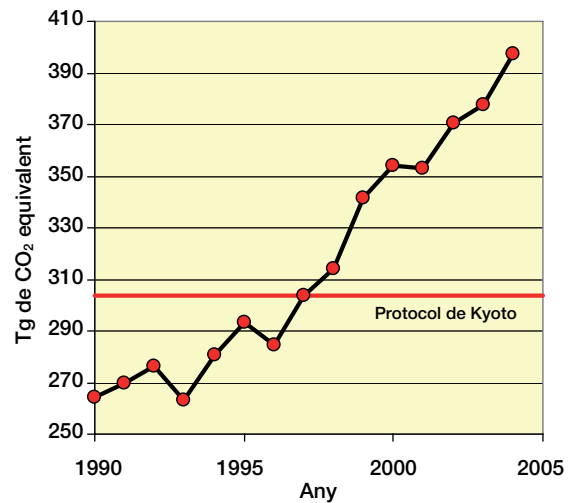
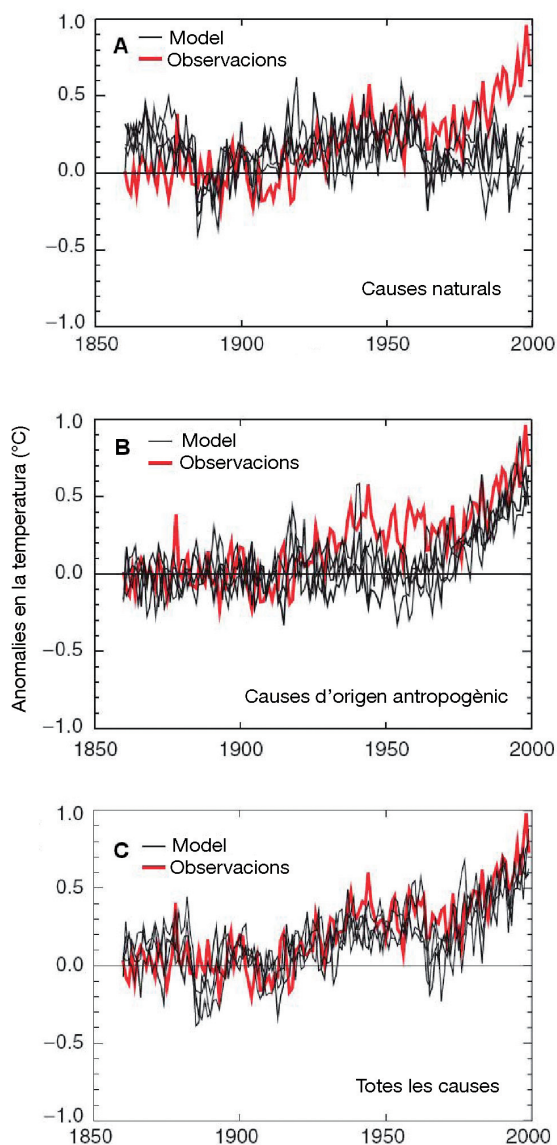


Figura 4. Emissions de CO₂ a Espanya. Les unitats són teragramms de CO₂ equivalent (mils de milions de tones). Les emissions de l'any 2004 representen un increment del 49 per cent respecte a les emissions de 1990 malgrat que el compromís del nostre país amb el Protocol de Kyoto ens imposa una limitació d'aquest increment del 15 per cent entre els anys 2008-2012 (línia horitzontal gruixuda).

junt, de 2,30 W m⁻² i la seva taxa d'increment durant l'era industrial és, molt probablement, la més elevada dels últims 10.000 anys (IPCC, 2007).

També és cert que hi ha altres efectes que contribueixen a un forçament radiatiu negatiu, és a dir, a una pèrdua d'energia i, per tant, a un refredament del planeta. Els aerosols, constituïts principalment per sulfats, partícules de carboni orgànic, nitrats i pols, contribueixen a absorbir una part de la radiació incident i a reflectir una altra fracció que provoca un efecte radiatiu negatiu de -1,2 W m⁻². Tot i aquesta contribució al refredament del planeta, la consideració de tots els fenòmens coneguts que contribueixen al balanç energètic del planeta, és a dir, la concentració de diòxid de carboni, metà, òxids de nitrogen, halocarbonis, ozó estratosfèric i troposfèric, efectes de la reflexió de la superfície del planeta (intensitat de la llum), efectes directes i indirectes dels aerosols, reflexió dels núvols i canvis en la irradiància deguts a l'activitat solar, ens aporten un balanç per al forçament radiatiu d'1,6 W m⁻² (IPCC, 2007). És a dir: el planeta reté més energia i s'escalfa. S'ha fet un gran esforç per tractar de comprendre quina és la contribució de les diferents causes naturals o antropogèniques d'aquest escalfament. La figura 5 mostra les anomalies de la temperatura és a dir, les desviacions observades amb registres instrumentals respecte de la temperatura mitjana del període que va de 1880 a 1920. Les dades observades mostren un increment de la temperatura que es fa molt acusat, sobretot a la segona meitat del segle passat. Si es comparen aquestes dades amb





el resultat de quatre simulacions portades a terme amb models climàtics que acoblen els fenòmens atmosfèrics i oceànics s'obtenen els resultats que es mostren a la figura. A la part superior (A) els models simulen solament les causes naturals, és a dir, els canvis en l'activitat solar i dels volcans. Els resultats dels models reproduïen bé la temperatura observada fins a 1960. A partir d'aquesta data les causes d'origen natural no permeten explicar l'augment observat. Quan en els models s'introdueixen només les causes d'origen humà (B), és a dir, l'increment dels gasos d'efecte hivernacle, els canvis en la concentració d'ozó estratosfèric i troposfèric, i els efectes directes i indirectes dels aerosols, els resultats reproduïen bé l'increment de la temperatura observat durant la segona meitat del segle XX, malgrat que existeixi alguna discrepància evident entre els anys 1950-1970. Les simulacions que incorporen tant les causes naturals

Figura 5. Desviacions de la temperatura global mitjana en relació als valors dels registres instrumentals del període de 1880 a 1920 comparades amb els resultats de quatre simulacions portades a terme amb un model climàtic que acobla oceà i atmosfera (de Stott et al., 2000; Tett et al., 2000) forçat amb a) les causes d'origen volcànic i solar solament, b) amb les causes d'origen antropogènic que inclouen l'increment dels gasos d'efecte hivernacle, canvis en la concentració d'ozó estratosfèric i troposfèric i els efectes directes i indirectes dels aerosols de sulfat, i c) amb totes les causes tant naturals com antropogèniques. La línia vermella mostra les mesures instrumentals i les línies negres, els resultats dels quatre conjunts de simulacions. Els canvis en la concentració d'aerosols de sofre es calculen interactivament i els canvis de concentració de l'ozó troposfèric es calculen independentment utilitzant un model de transport químic. Els canvis en la reflexió dels núvols (el primer efecte indirecte dels aerosols de sofre) es calculen en simulacions independents (Jones et al., 1999) i s'inclouen en el model. Els canvis en l'ozó estratosfèric es basen en observacions. El forçament degut als volcans es basa en les dades de Sato et al. (1993) i el forçament solar es basa en Lean et al. (1995), actualitzat per a 1997. El forçament antropogènic net al 1990 va ser d' $1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ incloent un refredament net d' $1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ degut als aerosols de sulfat. El forçament natural de 1990 va ser de $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ respecte de 1860 i al 1992 es va produir un refredament net de $2,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ degut a l'erupció del Pinatubo. (IPCC, Third assessment Report, 2001)

com les d'origen humà (C) reproduïen satisfactòriament la sèrie de temperatures observades i posen de manifest la contribució humana a l'escalfament del planeta.

Poden, els boscos, segrestar suficient quantitat de CO_2 com per compensar les nostres emissions?

Els ecosistemes, principalment els boscos, afecten de manera important el cicle del carboni del Planeta. Quan parlem de balanços de carboni la qüestió crucial és fins a quin punt els sistemes naturals estan actuant com a captadors i acumuladors de carboni. En aquest balanç intervien molts processos complexos subjectes a múltiples interaccions. Tancar aquest balanç amb cert detall no resulta una tasca fàcil i menys quan intervien en l'anàlisi escales de temps i espai diferents. També apareixen incerteses pel que fa a la comprensió de com afecten, de forma combinada, les condicions ambientals que interaccionen amb els processos implicats. S'ha avançat molt en els últims anys, però encara queda molt per investigar. El balanç del carboni depèn, de manera important, de dos processos essencials que formen part de l'activitat dels organismes: la fotosíntesi i la respiració. No obstant això s'ha d'assenyalar que, tot i que pels resultats ho semblin, fixació i alliberament de carboni de l'ecosistema no són passos inversos del mateix procés. Són processos independents en la seva evolució, bio-



química i localització: la fixació té lloc en els cloroplasts mentre que la respiració es produeix als mitocondris. I un punt crucial que sovint s'oblida: l'entrada de carboni al cloroplast es produeix en el procés d'intercanvi de gasos de manera que la planta, en obrir estomes, transpira una quantitat considerable d'aigua. Sovint les limitacions en la disponibilitat hídrica actuen forçant el tancament estomàtic i limitant l'entrada i l'absorció de CO_2 . Resulta fonamental entendre el paper de l'aigua en l'absorció de CO_2 en els ecosistemes mediterranis, des d'una perspectiva quantitativa.

En un exemple particular (Bellot, 1989), la precipitació mesurada en una conca experimental, de substrat impermeable, de les muntanyes de Prades (Tarragona) és, de mitjana, de 560 mm anuals (fig. 6). De l'aigua de pluja, 28 mm (un 5% del total) circulen anualment per la xarxa de drenatge i la resta són retornats directament a l'atmosfera per les capçades dels arbres i la vegetació del sotabosc. A la conca de l'Àvic, on es van portar a terme les mesures experimentals, hem comprovat que l'aigua directament evaporada suposa un 10% del total i, per tant, l'aigua transpirada per la vegetació representa la diferència, o sigui un 85% de la precipitació, o el que és el mateix, la vegetació retorna a l'atmosfera a través dels seus estomes 476 litres d'aigua per cada m^2 de bosc. En aquestes condicions, l'alzinar de la conca de l'Àvic fixa anualment entre 840 i 1.960 g de C/ m^2 depenent dels anys o sigui una mitjana de 1.380 g de C/ m^2 que els fixa en forma de carbohidrats amb un pes aproximat de 2.760 g de MO/ m^2 , la qual cosa equival a dir que aquests alzinars fixen 2,9 g de carboni per cada litre d'aigua transpirada al llarg de l'any o, si es prefereix, presenten una eficiència en l'ús de l'aigua de 4,35 mmols de C/mol de H_2O . Aquesta enorme desproporció entre l'aigua transpirada i el carboni absorbit és la causa que fa que les plantes resultin tan absolutament dependents de la disponibilitat d'aigua. A l'estiu, amb la major part dels sòls mediterranis secs, les plantes tanquen els seus estomes. Tancar estomes a causa de la falta d'aigua significa tancar el pas a l'entrada de CO_2 i limitar la fotosíntesi així com impedir la refrigeració de les fulles que reben, en el cas del Mediterrani, un excés de radiació durant l'estiu. La demanda evaporativa de l'atmosfera tendeix a incrementar-se intensificant la sequera dels nostres ecosistemes i estimulando la transpiració.

Si aquesta tendència s'accentua i a això s'hi afegeix que no incrementa la disponibilitat d'aigua –ja hem vist que es preveu una reducció de la precipitació a les regions mediterrànies– les plantes veuran accentuat el seu estrès hídric i disminuïdes les seves opcions per realitzar la fotosíntesi. A més, l'aigua que

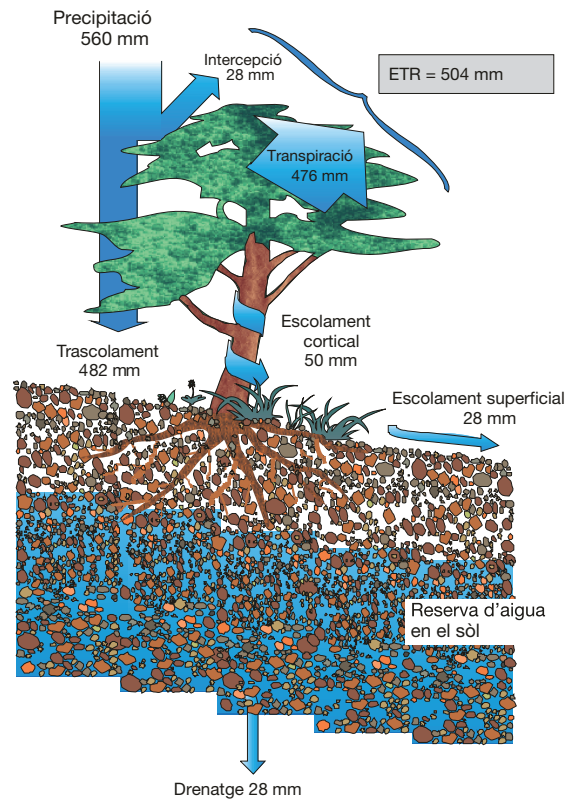


Figura 6. Fluxos hídrics mesurats en el bosc de Poblet. La precipitació anual és, de mitjana, de 560 mm dels que arriben al sòl, directament per trascolament a través de les capçades, 482 mm i 50 mm més són captats per les fulles i les branques, i són reconduïts al sòl per escolament cortical. Del total de 532 mm que arriben al sòl, 28 es perden per escolament superficial, 28 més són drenats i 476 són absorbits per les arrels i transpirats en la capçada de la vegetació. L'evapotranspiració, en conjunt, retorna a l'atmosfera anualment 504 mm, és a dir, el 90% de la precipitació.

deixaran les plantes en el sòl serà menor que la que deixen actualment assecant-se més en els períodes de sequera i resultant, per tant, més susceptibles a cremar-se i afavorir la propagació d'incendis.

Fins aquí hem vist els punts clau que poden ajudar-nos a comprendre les entrades de carboni en els ecosistemes naturals. Hem vist que, per terme mig, perquè entrin entre 2 i 3 g de carboni a la planta han de sortir de l'ordre de 1.000 g d'aigua, o sigui, entre 300 i 500 vegades el seu pes i hem vist que, en aquestes condicions, els arbres arriben a captar uns 1.400 g de carboni cada any. Aquesta és una xifra considerable: 1.400 g de carboni equivalen a 5.100 g de CO_2 la qual cosa equival a dir que la quantitat de carboni absorbit per un bosc mitjà del nostre país pot superar les 50 tm/ha de CO_2 anuals. Però desgraciadament absorbir CO_2 no equival a fixar-lo permanentment com alguna vegada s'interpreta erròniament. Una part molt considerable d'aquest CO_2 absorbit es torna a l'atmosfera en



els processos de respiració. La pregunta pertinent és, per tant, quina és la quantitat retornada i, en tot cas, quina és l'absorció neta d'una ha de bosc.

Sortides de carboni: la respiració

La respiració és la via mitjançant la qual els organismes aprofiten l'energia química emmagatzemada a la matèria orgànica. Aquest procés és molt general i no només l'utilitzen les plantes que porten a terme la fotosíntesi; també l'utilitzen els animals i els microorganismes (bacteris i fongs). De manera simplificada podem dir que en oxidar-se la matèria orgànica es consumeix oxigen i es produeix CO_2 i aigua, i es recupera l'energia química del carboni reduït durant la fotosíntesi. D'aquesta manera el CO_2 troba el seu camí de retorn a l'atmosfera. Per tant, els productors primaris fan fotosíntesi i respiren, i depenen d'ells mateixos per produir matèria orgànica i utilitzar l'energia química que hi ha quedat fixada. Per aquesta raó se'ls denomina autòtrofs i a la seva respiració se la coneix com a respiració autotròfica. La diferència entre el carboni fixat a la fotosíntesi (producció primària bruta) i la respiració autotròfica constitueix la denominada producció primària neta. Aquest balanç ens explica el creixement i el manteniment de la biomassa. Perquè un sistema, bosc, matoll o pastura mantingui o incrementi la seva estructura, la producció primària neta no pot ser negativa. A més, com que d'aquest balanç positiu de carboni en depenen els altres organismes de l'ecosistema, se n'ha de produir suficient com per compensar també el creixement i la respiració dels restants organismes de l'ecosistema que no són autòtrofs: els denominats heteròtrofs. Aquests organismes depenen de la matèria orgànica fixada pels productors primaris i, a la seva respiració, que funciona igual que la de les plantes, se la denomina heterotròfica. La producció neta de l'ecosistema és la diferència entre la producció primària neta i la respiració heterotròfica.

Mentre les entrades de CO_2 a la planta es limiten a la producció bruta i es veuen, sovint, limitades per la disponibilitat d'aigua, com hem vist anteriorment, les sortides es produeixen per vies múltiples i alternatives tal com es veu a la figura 7. Per una banda es torna una fracció de CO_2 a l'atmosfera cada cop que se sintetitza una fracció de nous teixits de la planta. És el que es denomina respiració de formació o respiració de creixement i aquesta respiració no suposa una fracció sense importància. Per cada gram de matèria orgànica que sintetitza la planta es tornen a l'atmosfera 0,2 g de C o 0,7 g de CO_2 . Dit d'una altra manera: la síntesi d'1 kg de fusta, de fulles o d'arrels representa retornar a l'atmos-

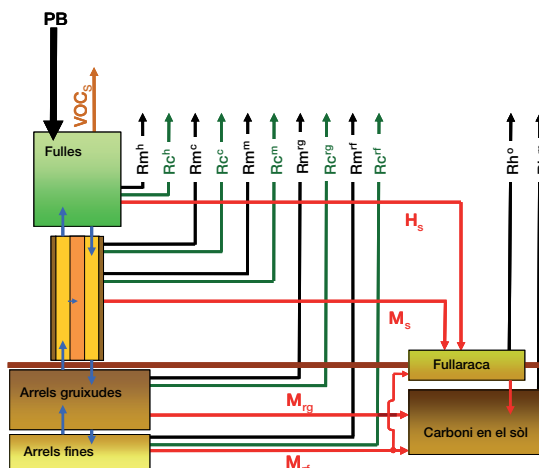


Figura 7. Components del balanç de carboni d'un sistema natural. El carboni fixat en la fotosíntesi, que constitueix la producció bruta, és l'entrada única de C a l'ecosistema. Les sortides, al contrari, són el resultat d'un conjunt de fluxos entre els quals s'han de destacar els compostos orgànics volàtils (VOCs), la respiració, tant de manteniment com de creixement de les fulles, teixits llenyosos i arrels, com la respiració heterotròfica de la fullaraca i altres restes vegetals, com del carboni orgànic present en el sòl i que, en conjunt, constitueixen la respiració heterotròfica.

fera 700 g de CO_2 . Però a més, els teixits formats s'han de mantenir permanentment, el que significa cremar més matèria orgànica de la que la planta ha fixat a la fotosíntesi per recuperar l'energia fixada en forma química amb la qual es podran reparar les proteïnes, àcids nucleics i, en general, totes les molècules i teixits que requereixen reparacions o substitucions. És la denominada respiració de manteniment. Si el cost de formació és molt poc variable entre plantes i fins i tot entre teixits d'una mateixa planta, el cost de manteniment resulta molt més variable. Depèn de la temperatura –en general, a més temperatura més elevada és la respiració– de la composició química dels teixits que s'han de mantenir i de la seva biomassa. Mantenir les fulles i arrels fines de l'arbre –amb diferència els teixits fisiològicament més actius, costa aproximadament entre 10 i 200 g de CO_2 al dia per cada kg de teixit a una temperatura de 15°C. Aquests valors es dupliquen per cada 10°C d'augment de la temperatura ($Q_{10}=2$) o sigui que, a una temperatura de 25°C mantenir la mateixa quantitat de teixit viu suposa retornar a l'atmosfera entre 20 i 400 g de CO_2 diaris (López et al., 1997, 1998, 2001a, 2001b).

La producció primària neta constitueix l'acumulació d'estructura de l'ecosistema, però també, si els compostos de carboni són mòbils, com per exemple els carbohidrats, constitueixen la reserva d'energia que la planta pot utilitzar en períodes en què la fotosíntesi no resulta possible, ja sigui perquè és de nit o per tractar-se d'un període d'estress hídric.



La respiració depèn del substrat (la matèria orgànica que s'oxida i de l'oxigen que abunda a l'atmosfera. En aquest cas no resulta necessària ni la llum ni el CO_2 (poc abundant comparat amb l'oxigen), ni l'aigua, si no és la que hi ha a la matriu cel·lular. Com a resultat, la respiració, així com la fotosíntesi, està condicionada per la temperatura que afecta essencialment l'activitat metabòlica, però no pels factors restants que modulen la fotosíntesi i no cessa mentre l'organisme disposi de substrat per respirar. Per tant, la respiració augmenta amb l'increment de temperatura, però atès un increment qualsevol, la respiració augmenta més del que ho fa la fotosíntesi. Aquesta diferència determina que, si augmenta la temperatura a causa del canvi climàtic, encara que els dos processos puguin veure's incrementats, la respiració augmentarà en més proporció que la fotosíntesi. L'augment de la temperatura és una de les variables més acceptades del canvi climàtic, per tant és possible que tingui lloc una disminució de la producció primària neta en no incrementar, de forma equivalent, la fotosíntesi. És més, si ens trobem en condicions de falta d'aigua, en les quals la fotosíntesi es veu limitada mentre la respiració continua activa, la producció primària neta pot quedar sensiblement afectada. Si la respiració autotròfica va consumint les reserves de carboni el bosc pot anar perdent estructura, per exemple una part de les fulles, i fins i tot arribar a episodis de mortalitat si el consum de les reserves d'alguns individus és total. Per això les reserves de carbohidrats són tan importants per explicar la superació d'episodis d'estrès ambiental ja que gràcies a les reserves de midó els arbres poden reconstruir les seves capçades després de perdre pràcticament totes les seves fulles (Gracia et al., 1997, 1999a, 1999b, 2001, 2002, 2006).

Quin és el balanç de carboni en els boscos mediterranis?

La quantitat de carboni que capten els boscos mediterranis se situa entorn als 1.400 g de C anuals per cada metre quadrat de bosc (o si es prefereix, 14 tones de $\text{C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$). És una quantitat considerable. Equival a absorbir més de 50 tones de CO_2 per ha anualment. I es comprèn que sigui així. Ja hem vist com l'aigua controla l'intercanvi de gasos. Un bosc típicament mediterrani pot arribar a transpirar fins a 500 l d'aigua per metre quadrat que, en sortir a través dels estomes, indueixen l'entrada de CO_2 que es fixa amb una eficiència que, com hem vist, resulta pròxima als 2 o 3 g de carboni per cada kg d'aigua transpirada. Malauradament, aquesta enorme quantitat de CO_2 fixat a la producció bruta es veu compensada per una quantitat de CO_2 del mateix ordre de magnitud que torna a l'atmosfera

com a conseqüència dels processos respiratoris a què ens hem referit anteriorment, amb la qual cosa el balanç net de carboni realment fixat resulta de molt escàs valor. Un típic bosc mediterrani amb una producció de 10 tm/ha anuals de matèria orgànica (que inclou la fusta i tots els restants teixits orgànics de les arrels, branques i fulles) retorna a l'atmosfera una tona de C (3,6 tones de CO_2) com a resultat de la respiració de creixement. La respiració de manteniment, molt més variable segons la temperatura i altres condicionaments biològics, sol representar entorn dels 2/3 de la producció bruta, en números rodons, unes 9 tones de carboni (33 tones de CO_2). La renovació de les fulles que cauen a terra i, a la llarga, acaben descomponent-se, pot representar dues tones de matèria orgànica. A aquestes s'ha d'afegir troncs i branques mortes, i la fracció de biomassa subterrània. En conjunt, cinc tones de matèria orgànica per ha i any que representen 2,5 tones de C. Naturalment aquestes xifres poden variar amb l'espècie, grau de maduresa i història recent del bosc, però representen els valors mitjans dels nostres boscos mediterranis. Veiem doncs que, en termes de carboni, de les 14 tones fixades 12,5 són retornades a l'atmosfera. El balanç net se situa doncs entorn a 1,5 tones de $\text{C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$ (o $150 \text{ g C m}^{-2} \text{any}^{-1}$). En altres paraules, els nostres boscos fixen unes cinc tones de $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{any}^{-1}$. En el cas de l'alzinar de Prades, estudiat amb molt de detall, la respiració de la matèria orgànica del sòl o respiració heterotròfica (453 g de $\text{C m}^{-2} \text{any}$) representa el 76% de la producció neta, (593 g de $\text{C m}^{-2} \text{any}^{-1}$).

Els nostres boscos experimenten canvis profunds

Peñuelas i Boada (2003) han comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny (Barcelona) amb la de 1945 i han pogut apreciar una progressiva substitució dels ecosistemes temperats (les fagedes) pels mediterranis (alzinars). Les fagedes s'han desplaçat en altitud, uns 70 m fins aconseguir les altituds màximes (1.600-1.700 m). A altituds mitjanes les landes de *Calluna* van sent reemplaçades pels alzinars, de manera que l'alzina es troba ja a altituds tan inesperades com els 1.400 m. Les condicions progressivament més càlides i àrides, junt als canvis d'ús del sòl, entre els quals s'ha de destacar l'abandonament de la gestió tradicional i la pràctica desaparició dels incendis associats a la ramaderia (actualment prohibits en el Montseny), expliquen aquests canvis en un exemple paradigmàtic de com interaccionen els diferents components del canvi global.

L'increment de la temperatura es reflecteix clarament en la resposta fenològica de les



plantes, atès que la fenologia és particularment sensible a les variacions de temperatura. Les fases fenològiques que tenen lloc a la primavera, com la brotada de les fulles, o l'activació de les gemmes resulten molt més sensibles a les variacions de temperatura mentre que les fases que tenen lloc a la tardor, com la caiguda de la fulla dels caducifolis, amb prou feines difereixen entre espècies. Durant les últimes dècades són cada vegada més abundants les observacions basades en la Xarxa Internacional de Jardins Fenològics creada al 1957 per Schnelle. Aquesta xarxa porta a terme observacions sistemàtiques de les dates en què tenen lloc les diferents fases fenològiques de moltes plantes. Utilitzant les observacions de l'esmentada xarxa, Menzel i Fabian (1999) han posat de manifest que les fases primaverals, tals com la brotada de les fulles, s'han avançat a Europa, de mitjana, 6,3 dies en el període de 1959 a 1996, o sigui, una mitjana de 0,21 dies/any. Paral·lelament, les fases tardorals s'han allargat 4,5 dies durant el mateix període, o el que és el mateix, 0,15 dies/any d'on es dedueix que el període vegetatiu s'ha allargat 10,8 dies des dels anys 60. Ni totes les espècies responen de la mateixa manera ni els canvis observats es produeixen amb la mateixa intensitat a totes les latituds.

Rotzer i Chmielewski (2000) han analitzat les dades existents a Europa sobre les dates d'inici i final del període vegetatiu i altres variables fenològiques. Aquests autors han relacionat les fases fenològiques de diferents espècies amb l'altitud i la latitud de cada lloc, i han trobat una dependència estreta tal i com s'hauria d'esperar atesa la dependència de la fenologia respecte de la temperatura i la dependència d'aquesta respecte de les coordenades geogràfiques.

A mesura que ens desplacem de sud a nord, una distància de 100 km, l'inici del període vegetatiu es retarda 2,3 dies. A més un increment de 100 m en l'altitud, es tradueix en un retard de 3,1 dies. A mesura que ens desplacem cap a l'oest, el gradient de continentalitat es tradueix en un retard del començament del període vegetatiu de 0,5 dies per cada 100 km. Segons aquestes relacions, el dia de l'any que correspon a l'inici del període vegetatiu es pot escriure com:

$$I_{pv} = 0.5 LON' + 2.3 LAT' + 3.1 ALT - 32.6 \quad (1)$$

on la variable LON' és la longitud equivalent expressada com la distància del punt al meridià de Greenwich a centenars de km (km/100); LAT' és la latitud equivalent expressada anàlogament com la distància del punt a l'equador en centenars de km i ALT' és l'altitud equivalent expressada en centenars de m (m/100).

Segons aquests autors, podem escriure l'equació que defineix el final del període

vegetatiu de manera anàloga a com hem definit l'inici com:

$$F_{pv} = -0.2 LON' - 0.1 LAT' - 1 ALT + 310.6 \quad (2)$$

El final del període vegetatiu s'avança 0,1 dies a mesura que ens desplacem de sud a nord una distància de 100 km. Un increment de 100 m en altitud, es tradueix en un avanç d'un dia. A mesura que ens desplacem cap a l'oest, el gradient de continentalitat es tradueix en un avanç de 0,2 dies per cada 100 km de desplaçament cap a l'est o, el que és el mateix, si sumem els 0,5 dies de retard de l'inici als 0,2 dies d'avanç del final, resulta que el període vegetatiu s'escurça 0,7 dies per cada 100 km que ens desplacem cap a l'est, com a conseqüència del gradient de continentalitat.

Ateses les característiques físiques d'Europa amb el mar Mediterrani que ocupa un paper preponderant a latituds inferiors als 45°, la presència del Mediterrani condiona el gradient de continentalitat de manera que, en les zones pròximes a la costa, les diferències est-oest es manifesten, si ho fan, de manera atenuada. A mesura que ens desplacem des de latituds de 45°N cap a latituds més baixes, el gradient de continentalitat s'atenua progressivament fins a desaparèixer quasi completament cap als 34°N. Per prendre en consideració aquest efecte de la presència del Mediterrani, hem calculat una correlació empírica que, incorporem a les equacions anteriors de Rotzer i Chmielewski.

D'aquesta manera, l'inici del període vegetatiu a Europa es pot estimar com:

$$I_{pv} = 0.5 LON' + 2.3 LAT' + 3.1 ALT - 32.6 - 0.045 LON' (54-LAT') \quad (3)$$

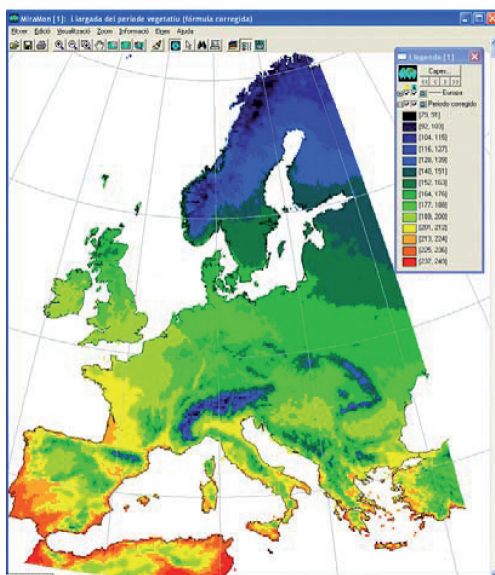
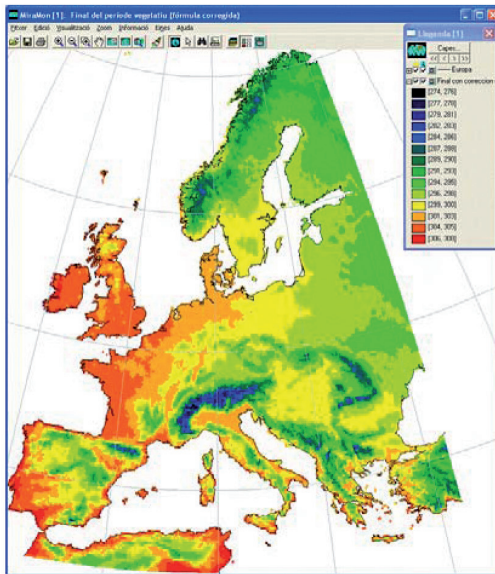
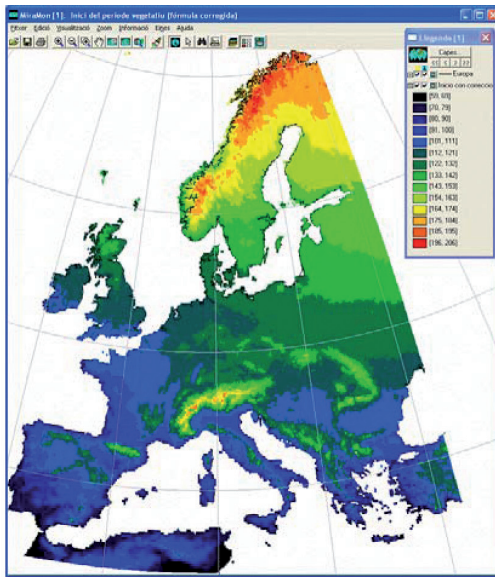
i el dia que correspon al final del període vegetatiu, com:

$$F_{pv} = -0.2 LON' - 0.1 LAT' - 1 ALT + 310.6 + 0.018 LON' (54-LAT') \quad (4)$$

Aquestes correccions introdueixen l'efecte de suavitzat del clima per la presència del Mediterrani. Aquest efecte de suavitzat resulta particularment important entre els 34°N i els 45°N, que correspon a distàncies aproximades de l'equador de 4.000 i 5.400 km. L'efecte de la longitud sobre el període vegetatiu de 0,7 dies/100 km s'amorteix progressivament a mesura que ens desplacem cap al sud per sota dels 45° de latitud N.

A partir d'aquests resultats resulta possible relacionar el valor d'aquestes variables fenològiques en cada punt del continent amb la seva temperatura i precipitació, la qual cosa permet explorar com variaran les esmentades variables sota diferents escenaris futurs. Els canvis en la durada del període vegetatiu resulten





particularment importants per entendre el comportament de la vegetació en les dècades futures. Tant les dates d'inici com de final del període vegetatiu estan molt estretament controlades per la temperatura per la qual cosa es pot pensar que un increment n'anticiparà l'inici i en retardarà el final tot provocant un allargament de la durada de l'activitat de les plantes. Aquesta elongació del període vegetatiu suposa la capacitat de transpirar una quantitat suplementària d'aigua. Tanmateix, en les condicions mediterrànies en les quals l'aigua resulta, ara per ara, el factor més limitant per a la vegetació i on tant els models com les observacions empíriques indiquen una reducció de la disponibilitat hídrica, el conflicte entre augment de la necessitat d'aigua i reducció de la disponibilitat pot suposar condicions localment difícils o impossibles de superar per a algunes espècies. L'exploració d'aquestes condicions futures resulta molt complexa atès que, per una banda, les respostes no són lineals i, per l'altra, les interaccions entre diferents processos fisiològics compliquen enormement l'anàlisi. Per explorar com es modificarà la durada del període vegetatiu en el futur i els seus efectes sobre la vegetació hem aplicat una aproximació que combina les observacions de Rotzer i Chmielewski amb la potència del model de simulació del creixement de masses forestals GOTILWA+.

L'estat vegetatiu d'una espècie en un moment qualsevol és el resultat de la integració de la temperatura fins aquest moment. La planta actua com un integrador de les condicions de temperatura que va experimentant. Quan s'aconsegueixen determinats llindars, específics de cada espècie, es desencadenen les diferents fases fenològiques de l'espècie. En un dia determinat, d , en què la temperatura mitjana és t_d °C, l'estat vegetatiu de la planta experimenta un canvi equivalent a:

$$\Delta V_d = \frac{t_d - t_0 - V_{d-1}}{\tau} \quad (5)$$

on t_0 és la temperatura llindar a la qual la taxa fotosintètica de la planta es fa mínima i t_1 la temperatura llindar a la qual aconsegueix el seu valor màxim. El terme τ reflecteix la inèrcia temporal amb què la planta respon als canvis diaris de temperatura i V_d és l'estat vegetatiu de la planta en el dia d que s'expressa amb:

Figura 8. Distribució geogràfica de les dates d'inici (a dalt), final (centre) i durada total (a baix) del període vegetatiu de la vegetació a Europa segons el model de Rotzer i Chmielewski (2000) basat en les observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics modificat i corregit per considerar l'efecte sobre el clima de la presència del Mediterrani per a latituds inferiors a 45°.



$$V_d = V_{d-1} + \Delta V_d \quad (6)$$

En altres paraules, l'efecte de la temperatura d'un dia qualsevol depèn del rang de temperatures ($t_0 - t_1$) a la qual l'espècie en qüestió resulta sensible.

D'aquesta manera, a partir d'una sèrie de temperatures diàries, s'obté una funció d'estat vegetatiu com la que es mostra a la figura 9. En qualsevol moment de l'any, la capacitat fotosintètica màxima potencial de l'espècie queda modulada per un factor k que varia entre un valor mínim 0 i un valor màxim 1 de manera que $k=0$ si $V_d < 0$ i l'activitat de la planta és nul·la. Quan $0 \leq V_d < 1$, $k=V_d$. Aquesta situació correspon a les condicions de transició del repòs a l'activitat en primavera o de l'activitat al repòs a la tardor. Quan $V_d \geq 1$, $k=1$ i la planta es troba en plena activitat.

Amb els valors obtinguts amb les equacions de Rotzer i Chmielewski a cada píxel, hem aplicat un procediment d'inversió de manera que, a partir de la sèrie de temperatures diàries 1960-1990, determinem els valors de la temperatura llindar màxima que dona com a resultat una durada del període vegetatiu igual a l'observada en l'esmentat píxel. Quan la temperatura llindar mínima (t_0) resulta escassament variable en el procediment d'estimació del llindar màxim, hem fixat els valors de $t_0=6^\circ\text{C}$ i $\tau=3$.

Un cop obtinguda la temperatura llindar màxima, resulta possible, si es disposa de les sèries de temperatures futures estimades per a cada píxel pels models de circulació atmosfèrica, aplicar el model de les equacions 5 i 6 per determinar com variarà la durada del període vegetatiu en el futur. D'aquesta manera obtenim els valors que es representen en els mapes de la figura 10 que corresponen a la durada del període vegetatiu estimada per als anys 2020, 2050 i 2080 i s'assumeixen els valors de temperatura i precipitació de cada píxel de $10' \times$

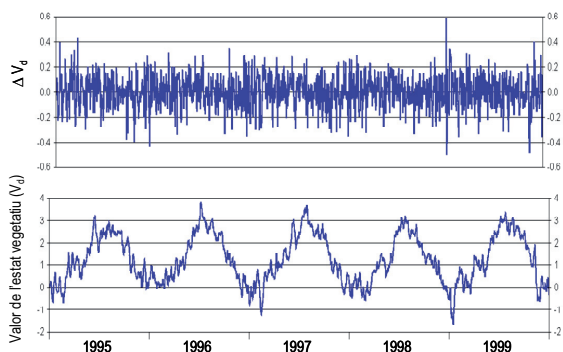


Figura 9. Evolució de l'activitat vegetativa de *Quercus ilex* entre els anys 1995 i 1999 a les muntanyes de Prades (Tarragona) calculada a partir de les temperatures diàries de la regió. Les temperatures llindars són $t_0=6^\circ\text{C}$, $t_1=12^\circ\text{C}$ i $\tau=3$. La durada mitjana del període vegetatiu durant els cinc anys va ser de 199 dies.

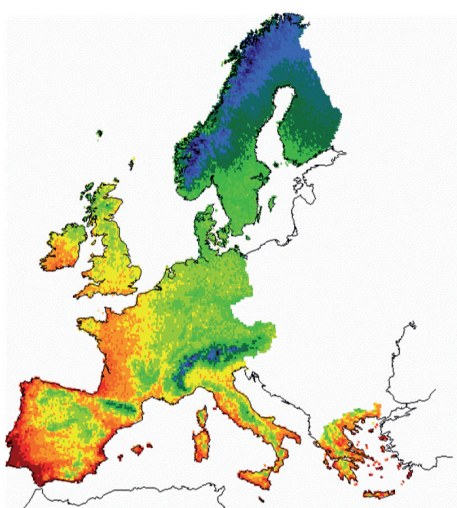
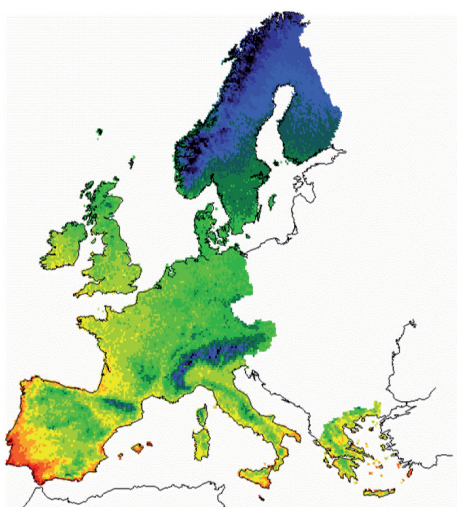
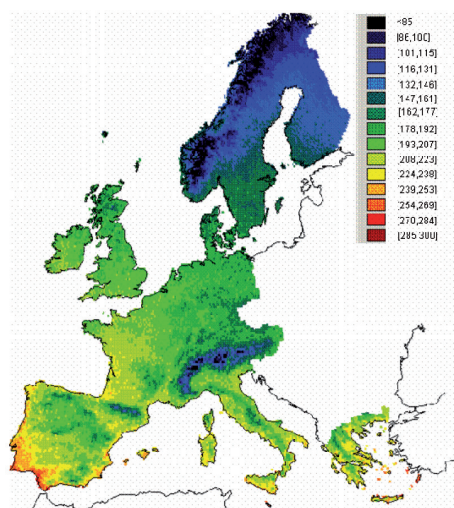


Figura 10. Durada total del període vegetatiu de la vegetació a Europa estimada per als anys 2020 (a dalt), 2050 (centre) i 2080 (a baix) estimada pel model GOTILWA+ en un escenari socioeconòmic A2 (IPCC, 2003) segons les condicions climàtiques projectades pel model HadCM3.



10' que prediu el model HadCM3 del Hadley Center sota un escenari socioeconòmic moderat (escenari A2, IPCC, 2003).

Resulta molt interessant analitzar les pautes de variació de la durada del període vegetatiu que prediu el model GOTILWA+. El període vegetatiu s'allarga de manera desigual de manera que, a l'any 2080 la seva durada en el Mediterrani passa de 207 a 257 dies mentre que a la regió boreal s'allarga de 140 a 173 dies. Si fem la comparació per països, en els països escandinaus tindrà una durada de 30 dies superior a l'actual mentre que en els països del Mediterrani s'allargarà entre 44 i 60 dies (els casos d'Espanya i Portugal respectivament). La taula 1 resumeix els valors calculats a partir dels ajustos de les observacions realitzades entre 1960 i 1990 i els valors estimats en cadascun dels països europeus i en cadascuna de les àrees climàtiques del continent els anys 2020, 2050 i 2080. El valor mitjà que s'assigna a cada país correspon a la mitjana dels valors de tots els píxels de 10' x 10' que corresponen a l'àrea ocupada per cada país o per cada àrea bioclimàtica respectivament.

Atès que la disponibilitat hídrica és el factor crític per avaluar els efectes del canvi climàtic sobre els nostres boscos, aquest allargament del període vegetatiu associat principalment a l'increment de la temperatura, pot comportar un augment de l'aigua transpirada que s'afegeix a més evaporació potencial, que resulta de l'augment de temperatura. En aquells enclavaments en què el bosc disposi d'aigua suficient com per compensar aquesta demanda hídrica més gran, és de preveure un augment de la producció forestal. Ara bé, a les àrees deficitàries d'aigua, que representen la major part dels ecosistemes terrestres del nostre país, es poden esperar canvis importants que van des de la reducció de la densitat d'arbres fins a canvis en la distribució d'espècies (Gracia et al., 2002, Ecosistemes AEET). En casos extrems, el bosc que actualment ocupa algunes àrees pot ser substituït pel matoll i àrees actualment ocupades per matolls poden patir els efectes de l'erosió.

Per això resulten tan importants els experiments de camp en què es manipula experimentalment la temperatura i la disponibilitat hídrica de l'ecosistema per estudiar els canvis funcionals i estructurals que poden tenir lloc en els ecosistemes si es compleixen les previsions dels models climàtics d'un augment de la temperatura acompanyat d'una reducció de la precipitació en el sud d'Europa. Un d'aquests experiments es porta a terme en un alzinar de bosc baix de les muntanyes de Prades (Tarragona). Es tracta d'un bosc que havia estat intensament carbonejat. En l'actualitat, els peus arriben a uns 6 m d'alçada i una densitat d'uns 17.000 peus/ha (2.000 soques/ha amb una densitat mitjana de 8.5 peus/soca). El bosc està dominat per *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*

Taula 1. Valors mitjans de la durada del període vegetatiu (dies) en les diferents àrees climàtiques i països d'Europa. Les dades de la columna 1960-1990 estan basades en l'equació de Rotzer i Chmielewski (2000) elaborada a partir de les dades observades a la Xarxa Internacional de Jardins Fenològics. Les dades dels anys 2020, 2050 i 2080 són el resultat obtingut amb el model de creixement forestal GOTILWA+ (Gracia et al., 2000) a l'escenari climàtic que preveu el model de circulació atmosfèrica HadCM3 en un escenari socioeconòmic A2 de l'IPCC (2001). L'algoritme utilitzat per a la simulació del període vegetatiu es descriu en el text. Cada valor és la mitjana dels valors obtinguts als píxels de 10' x 10' que cobreixen cada àrea climàtica o cada país respectivament.

	1960-1990	2020	2050	2080
Tipus de Clima				
Àrtic	111,6	105,9	120,1	149,5
Alpí	133,6	133,3	141,3	162,6
Boreal	140,4	146,6	154,1	173,3
Continental	175,3	182,0	188,6	207,4
Atlàntic	186,1	195,4	205,3	228,3
Mediterrani	206,6	223,1	230,3	256,5
País				
Alemanya	176,6	183,4	190,6	208,7
Anglaterra	183,5	194,4	205,5	227,7
Àustria	156,1	163,3	171,6	190,4
Bèlgica	187,0	195,2	201,5	219,1
Bulgària	185,5	194,5	200,4	221,0
Dinamarca	172,5	177,1	187,7	203,1
Eslovàquia	168,5	175,0	182,2	202,0
Eslovènia	176,7	185,4	193,8	211,2
Espanya	200,7	212,6	221,7	245,4
Estònia	150,7	157,2	167,3	188,1
Finlàndia	128,4	133,3	141,5	160,1
França	192,5	202,6	208,0	231,1
Grècia	205,0	219,2	223,2	250,2
Holanda	187,6	193,9	201,9	220,4
Hongria	184,9	190,2	197,2	215,9
Irlanda	192,2	202,9	215,9	240,5
Itàlia	189,7	198,3	206,5	227,5
Letònia	154,8	160,0	170,9	190,4
Liechtenstein	157,0	155,2	168,1	186,3
Lituània	159,3	164,0	174,5	193,5
Luxemburg	180,4	187,4	195,8	209,9
Noruega	123,9	119,0	129,6	154,7
Polònia	169,5	175,0	182,9	201,2
Portugal	218,1	237,9	251,4	278,6
Romania	175,2	182,1	186,8	207,4
Suècia	134,6	138,3	143,1	164,9
Súissa	149,9	152,4	165,1	183,9
Txèquia	168,3	173,4	182,5	199,3
Europa	168,5	176,2	183,9	205,4

i *Arbutus unedo*. A l'experiment s'exclou una fracció de la pluja fins aconseguir una disminució d'un 15% de la humitat del sòl. Aquesta reducció de l'aigua disponible alenteix els cicles de l'aigua, del C, del N i del P i afecta tant la fisiologia com la demografia de les espècies. Aquests resultats confirmen les pautes de resposta obtingudes en un experiment anterior de fertilització i irrigació (Sabatè i Gracia, 1994) en què es va obtenir una resposta ja sigui respecte a la irrigació, que va afectar positivament la taxa de creixement dels arbres, com respecte al nitrogen que va tenir efectes notoris sobre la dinàmica foliar. A l'experiment actual, la reducció del 15% d'humitat en el sòl ha reduït el creixement diametral dels troncs en un 37%, encara que no totes les espècies es veuen afectades en igual proporció. Mentre que unes són



Taula 2. Diàmetre mitjà (mm) a l'hivern del 2005 de les alzines rebrotades després de l'incendi de 1998. Noteu que en els tractaments sense tala, en què no s'ha reduït la densitat de plantes nascudes de llavor, la competència entre peus és tan intensa que l'efecte de reduir en un 15 per cent la quantitat de pluja que arriba al sòl, no té efecte significatiu sobre el creixement. Per contra, en els tractaments amb tala, el creixement diametral és més gran i l'efecte de reduir la precipitació resulta significatiu.

		Gestió	
		Amb tala	Sense tala
Aigua en el sòl	Precipitació	44,5±1,4 (*)	31,3±2,6
	Sequera (-15%)	41,4±2,2 (*)	31,1±1,1

Taula 3. La taxa de creixement relatiu a l'hivern del 2005, de les alzines de Castelltallat (Barcelona) rebrotades després de l'incendi de 1998. Noteu que en els tractaments sense tala, en què no s'ha reduït la densitat de plançons, la competència entre peus és tan intensa que l'efecte de reduir en un 15 per cent la quantitat de pluja que arriba al sòl, no té efecte significatiu sobre la taxa de creixement relatiu. Per contra, en els tractaments amb tala, la taxa de creixement relatiu és més gran i l'efecte de reduir la precipitació resulta significatiu.

		Gestió	
		Amb tala	Sense tala
Aigua en el sòl	Precipitació	0,35±0,04 (*)	0,20±0,02
	Sequera (-15%)	0,31±0,01 (*)	0,19±0,01

extremadament sensibles, com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren una reducció del creixement del diàmetre del 77 i el 55% respectivament, altres espècies com *Phillyrea latifolia* no presenten resposta apreciable. Anàlogament, la mortalitat mostra un patró semblant ja que en condicions de sequera augmenta la mortalitat i *Arbutus unedo* i *Quercus ilex* mostren una mortalitat més elevada que *Phillyrea latifolia*. En condicions de sequera l'acumulació de biomassa total aèria del bosc, calculada aplicant equacions al·lomètriques, ha disminuït un 42% (Ogaya et al., 2003).

Altres experiments presenten resultats que resulten congruents amb els que acabem de comentar i apunten a la mateixa direcció. En un alzinar cremat de Castelltallat (Barcelona) durant l'estiu de 1998, s'estan investigant els fluxos de carboni en el bosc en regeneració després de l'incendi. Atesa l'elevada densitat de plantes nascudes de llavor que poden arribar a originar-se, el tractament de reducció d'aigua s'ha combinat amb un tractament de reducció de la densitat de plantes nascudes de llavor per explorar les possibilitats d'actuar sobre el balanç final del carboni del bosc mitjançant diferents alternatives de gestió. Alguns resultats preliminars es resumeixen a les taules 2 i 3.

En aquells tractaments en què no s'ha reduït la densitat de plantes nascudes de llavor,

la competència entre peus és tan intensa que l'efecte de reduir en un 15% la pluja que arriba al sòl, no té efecte significatiu sobre el creixement. Per contra, en els tractaments amb tala, el creixement diametral és més gran i l'efecte de reduir la precipitació resulta significatiu.

Aquests experiments estan posant de manifest que, sota condicions més àrides que les actuals els boscos mediterranis poden reduir notablement les seves taxes de creixement i, per tant, la seva capacitat per actuar com a embornals de carboni atmosfèric. A més, ja que no totes les espècies resulten igualment afectades, a llarg termini es produirà un canvi en la composició específica del bosc, i resultaran més afavorides les espècies més resistents a la sequera en detriment de les que presenten menor resistència.

Davant d'aquesta perspectiva resulta fonamental explorar la capacitat de gestionar els nostres ecosistemes amb la perspectiva de minimitzar els efectes adversos del canvi climàtic que, en les nostres latituds, depenen fonamentalment de la disponibilitat hídrica. Reduir la densitat d'algunes masses forestals extremadament denses, sobretot aquelles que s'han originat per rebrot de soques prèviament tallades repetidament, pot resultar útil perquè, com hem vist, contribueix a reduir la respiració del bosc i, en distribuir l'aigua disponible entre un menor número de peus, contribueix a millorar el balanç hídric dels arbres i permet superar, en alguns casos, els efectes adversos de sequeres prolongades.

Bibliografia

- AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE (2006). Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2006. 27 Oct 2006
- ALMARZA, C. (2000). Respuesta al Calentamiento Global de la serie de temperatura media anual de Madrid. *Actas de la II Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica*.
- AYALA-CARCEDO, F.J. (2003). Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad física y ecológica del Plan Hidrológico Nacional 2001. A: ARROJO i DEL MORAL (eds.), *La Directiva Marco del Agua: Realidades y Futuros*, pp. 253-271. Fundación Nueva Cultura del Agua, Zaragoza.
- BELLOT, J. (1989) *Análisis de los flujos de la deposición global, trascolación, escorrentía cortical y deposición seca en el encinar mediterráneo de L'Avic*. PhD Thesis, Universidad de Alicante, España.
- GRACIA, C., SABATÉ, S. i TELLO, E. (1997). Modelling the response to climate change of Mediterranean forest managed at different thinning intensities: effects on growth and water fluxes. A: MOHREN, G.M.J., KRAMER,



- K. i SABATÉ, S. (eds.), *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*, pp. 243-252. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- GRACIA, C.A., SABATÉ, S., MARTÍNEZ, J.M. i ALBEZA, E. (1999a). Functional responses to thinning. A: RODÀ F., RETANA J., GRACIA C. i J. BELLOT (eds.), *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies*, 137: 329-338.
- GRACIA, C.A., TELLO, E., SABATÉ, S. i BELLOT (1999b). GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. A: RODÀ F., RETANA J., GRACIA C. i BELLOT J. (eds.), *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies*, 137: 163-179.
- GRACIA, C.A., SABATÉ, S., LÓPEZ, B. i SÁNCHEZ, A. (2001). *Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión y cambio global. Publicación del Simposium de la SEET*. Sociedad Española de Ecología Terrestre celebrado en Granada, Febrero 2000.
- GRACIA, C.A., SABATÉ, S. i SÁNCHEZ, A. (2002). El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas 2* <http://www.aeet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>
- GRACIA, C.A. (2006). El Bosc de Poblet i el rept de Canvi Climàtic. 2es Jornades sobre el Bosc de Poblet i les Muntanyes de Prades pp. 221-243.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (2002). *Valores normales y estadísticos de observatorios meteorológicos principales (1971-2000)*. Vols. 1-5.
- IPCC. (2001). The Scientific Basis. Third Assessment Report of Working Group I, A: J.T. HOUGHTON, D. YIHUI, et al. (eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- IPCC. 2007. The Physical Science Basis. Fourth Assessment Report of Working Group I. A: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING M., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR, M.M.B., MILLER, H. i CHEN, Z. (eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- KRAMER, K., LEINONEN, I., BARTELINK, H.H., BERBIGIER, P., BORGHETTI, M., BERNHOFER, CH., CIENCIALA, E., DOLMAN, A.J., FROER, O., GRACIA, C.A., GRANIER, A., GRÜNWARD, T., HARI, P., JANS, W., KELLOMÄKI, S., LOUSTAU, D., MAGNANI, F., MATTEUCCI, G., MOHREN, G.M.J., MOORS, E., NISSINEN, A., PELTOLA, H., SABATÉ, S., SANCHEZ, A., SONTAG, M., VALENTINI, R. i VESALA, T. (2002). Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at 6 forest sites in Europe. *Global Change Biology*, 8: 213-230.
- LÓPEZ, B., SABATÉ, S., RUÍZ, I. i GRACIA, C. (1997). Effects of elevated CO₂ and decreased water availability on holm oak seedlings in controlled environment chambers. A: MOHREN, G.M.J., KRAMER, K. i SABATÉ, S. (eds.), *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*, pp. 125-133. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- LÓPEZ, B., SABATÉ, S. i GRACIA, C. 1998. Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: effects of drought and stem density. *Tree Physiology*, 18: 601-606.
- LÓPEZ, B., SABATÉ, S. i GRACIA, C.A. (2001a). Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest. *Plant and Soil*, 230: 125-134.
- LÓPEZ, B., SABATÉ, S. i GRACIA, C.A. (2001b). Fine root longevity of *Quercus ilex*. *New Phytologist*, 151(3): 437-441.
- MENZEL, A. i FABIAN, P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397: 659.
- OGAYA, R., PEÑUELAS, J., MARTÍNEZ-VILALTA, J. i MANGIRÓN, M. (2003). Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain. *Forest Ecology and Management*. 180: 175-184.
- PARRY, M., PARRY, C. i LIVERMORE, M. (eds.) (2000). Valoración de los efectos potenciales del cambio climático en Europa (Informe ACCIA de la Comisión Europea, Resumen y conclusiones), Universidad de Castilla-La Mancha-Iberdrola, Toledo, 29 pp.
- PEÑUELAS, J. i BOADA, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9: 131-140.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., LLUSIÀ, J., SISCART, D. i PIÑOL, J. (1998). Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Journal of Experimental Botany*, 49: 229-238.
- PETIT, J.R., JOUZEL, J., RAYNAUD, D., BARKOV, N.I., BARNOLA, J.-M., BASILE, I., BENDER, M., CHAPPELLAZ, J., DAVIS, M., DELAYQUE, G., DELMOTTE, M., KOTLYAKOV, V.M., LEGRAND, M., LIPENKOV, V.Y., LORIUS, C., PÉPIN, L., RITZ, C., SALTZMAN, E. i STIEVENARD, M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- CHMIELEWSKY, F.M. i RÖTZER, T. (2002). Annual and spatial variability of the beginning of the growing season in Europe in relation to air temperature. *Climate Research*, 19: 257-264.
- SABATÉ, S., GRACIA, C.A. i SÁNCHEZ, A. (2002). Likely effects of Climate Change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean Region. *Forest Ecology and Management*, 162: 23-37.

