

## B9. Sistemes naturals: ecosistemes terrestres

### Josep Peñuelas i Iolanda Filella

Unitat d'Ecofisiologia CSIC-CEAB-CREAF, CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals)

### Santi Sabaté i Carles Gràcia

CREAF i Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona

**Josep Peñuelas i Reixach** (Vic, 1958) és professor d'Investigació del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC). Dirigeix la Unitat d'Ecofisiologia CSIC-CEAB-CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona). Especialitzat en ecofisiologia, estudia les interaccions biosfera-atmosfera. Alguns dels àmbits on ha treballat recentment són: el canvi global, el canvi climàtic, la contaminació atmosfèrica, la teledetecció, l'ecofisiologia vegetal i el funcionament i l'estructura dels ecosistemes mediterranis. Ha publicat 5 llibres d'ecologia, 350 articles en revistes i llibres científics (200 dels quals en revistes recollides en el *Science Citation Index*) i més de 250 articles de divulgació científica en mitjans com *La Vanguardia*, *l'Avui* i *El País*.

Professor visitant o investigador visitant a les universitats de Stanford, Los Angeles, Washington, Duke, Lancaster, Avinyó, París, Saint Adreus, Mèxic, Tokio, Lancaster i Sheffield. Professor titular d'ecologia de la Universitat de Barcelona fins l'any 1990. Ha dirigit 14 tesis doctorals, 12 màsters i ha tingut al seu càrrec 11 estudiants post-doctorals. Ha dirigit nombrosos projectes de recerca subvencionats per les agències científiques dels governs català, espanyol i per la Comissió Europea, així com per capital privat. És membre del consell editorial i col·labora en l'avaluació i revisió d'articles de nombroses revistes científiques de referència de gran prestigi (per exemple, *Ecology Letters*, *Remote Sensing of the Environment*, *Ecology*, *Global Change Biology*, *Science*) i en l'avaluació de projectes de diversos programes d'investigació nacionals i internacionals.

És president de la Institució Catalana d'Historia Natural, membre de nombroses acadèmies i associacions científiques nacionals i internacionals. Ha rebut nombroses beques i distincions, tant nacionals (Comte de Barcelona, per exemple), com internacionals (NASA, Ministeri de Ciència del Japó, etc.).

**Iolanda Filella Cubells** (la Palma d'Ebre, Tarragona, 1967) és científic titular del CSIC. Pertany a la Unitat d'Ecofisiologia CSIC-CEAB-CREAF. Ecòloga especialitzada en fisiologia vegetal. Els seus temes de recerca més recents són el canvi global, el canvi climàtic, la contaminació atmosfèrica, la teledetecció, l'ecofisiologia vegetal, la fenologia i el funcionament i l'estructura dels ecosistemes mediterranis.

Dels resultats dels seus estudis destaquen el desenvolupament de tècniques de teledetecció del funcionament d'ecosistemes, que ara són utilitzats àmpliament a escala internacional, i l'estudi d'evidències de l'efecte del canvi global i climàtic sobre l'estructura i el funcionament dels ecosistemes (amb especial atenció als ecosistemes mediterranis).

Sistemes naturals: ecosistemes terrestres Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Santi Sabaté i Carles Gràcia

Ha dirigit i/o participat en nombrosos projectes subvencionats per les agències científiques dels governs català, espanyol i europeu, així com per capital privat. Col·labora en l'avaluació i la revisió d'articles de nombroses revistes científiques de referència (entre altres, *International Journal of Remote Sensing*, *Remote Sensing of Environment*, *Environmental and Experimental Botany*, *Tree Physiology*, *New Phytologist* i *Journal of Environmental Quality*). Ha publicat 70 articles en revistes científiques, 50 dels quals en revistes recollides en el *Science Citation Index*. També ha participat força activament en la divulgació als mitjans de comunicació dels resultats dels estudis realitzats (per exemple, TVC, TVE i BTV).

**Santi Sabaté i Jorba** (Barcelona, 1960) és biòleg. Actualment és professor titular d'ecologia al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona i investigador del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). Especialitzat en ecologia forestal, la seva activitat docent i de recerca se centra en l'estudi de l'estructura i la funció dels ecosistemes, els balanços de carboni, aigua i nutrients, i les respostes ecofisiològiques dels boscos al canvi climàtic, la sequera, els incendis i la gestió. Aquesta activitat es desenvolupa tant en treballs experimentals com en el de la modelització.

És coautor de GOTWILA+, un model de simulació del creixement dels boscos sota diferents escenaris de gestió i condicions ambientals (inclosos escenaris de canvi climàtic). Ha participat i continua participant activament en nombrosos projectes de recerca europeus, estatals i catalans. És membre del comitè de gestió de l'acció europea COST E-21 (contribució dels boscos i el sector forestal a la mitigació dels efectes dels gasos amb efecte d'hivernacle). Ha dirigit i publicat nombrosos treballs de recerca, incloent llibres i articles científics. És membre de nombroses acadèmies i associacions científiques nacionals i internacionals.

**Carles A. Gràcia i Alonso** (Saragossa, 1951) és biòleg. Actualment és professor titular d'ecologia al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona i investigador del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). Està especialitzat en ecologia forestal i la seva activitat docent i investigadora se centra en l'estudi de l'estructura i funció dels ecosistemes, els balanços de carboni i aigua, així com les respostes ecofisiològiques dels boscos al canvi climàtic. Aquesta activitat es desenvolupa tant en treballs experimentals com de modelització.

És coautor del GOTWILA+, un model de simulació del creixement dels boscos sota diferents escenaris de gestió i condicions ambientals (inclosos escenaris de canvi climàtic). Ha participat i continua participant activament en nombrosos projectes de recerca europeus, estatals i catalans. Actualment és vicepresident de l'Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET) i vocal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF). Ha estat director de l'*Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya* (IEFC).

Ha dirigit nombroses tesis, tesines i màsters al llarg de més de 25 anys de dedicació a l'ecologia. Ha publicat llibres i articles científiques així com de divulgació i opinió a *El Periódico* i altres diaris. És membre de nombroses acadèmies i associacions científiques nacionals i internacionals.

Síntesi	521
B9.1. Estudis paleoecològics, històrics, observacionals, experimentals i de modelització en el temps i en l'espai a Catalunya	523
B9.2. El canvi climàtic de les darreres dècades: escalfament i eixutesa	524
B9.3. Els canvis temporals i l'alteració dels cicles vitals dels éssers vius	525
B9.3.1. Les alteracions de les comunitats	527
B9.3.2. Les alteracions en l'activitat dels ecosistemes i la biosfera	528
B9.4. Altres canvis als ecosistemes terrestres en resposta al canvi climàtic i a les interaccions d'aquest amb altres components del canvi global	529
B9.4.1. Increment en la freqüència de les sequeres severes	529
B9.4.2. Increment de la freqüència i intensitat dels incendis forestals	530
B9.4.3. Increment de l'emissió de compostos orgànics volàtils	532
B9.4.4. Increment de la presència de nitrats a les aigües	532
B9.4.5. Efectes directes de l'augment de CO <sub>2</sub> sobre els ecosistemes	533
B9.5. Canvis estructurals i en la distribució espacial dels ecosistemes	534
B9.6. El futur dels ecosistemes terrestres mediterranis davant el canvi climàtic previst per a les properes dècades	536

Sistemes naturals: ecosistemes terrestres Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Santi Sabaté i Carles Gràcia

B9.6.1. Els boscos mediterranis	537
B9.6.2. Els matollars mediterranis	538
B9.6.3 . Els processos d'erosió i desertització	540
B9.7. Els efectes del canvi climàtic sobre els béns i serveis proporcionats pels ecosistemes terrestres i la seva gestió	541
B9.7.1. Els balanços de carboni als boscos i matollars catalans	542
B9.7.1.1. Entrades de carboni: la fotosíntesi	542
B9.7.1.2. Sortides de carboni: la respiració	543
B9.7.1.3. La renovació foliar	544
B9.7.1.4. La respiració heterotròfica i el balanç de carboni de l'ecosistema	545
B9.7.1.5. Els models en l'exploració d'escenaris futurs	546
B9.7.2. Algunes actuacions per als propers anys: més recerca i millores en la gestió dels ecosistemes	548
B9.8. Instal·lats en el canvi	550
Referències bibliogràfiques	551

## Síntesi

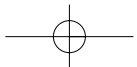
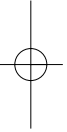
A Catalunya, com passa arreu del planeta, ja es disposa d'una quantitat substancial d'evidències observacionals sobre els efectes biològics del canvi climàtic. L'arribada de la primavera s'ha avançat i la de l'hivern s'ha retardat, de manera que en els darrers cinquanta anys el període vegetatiu s'ha perllongat, per terme mitjà, uns 5 dies cada dècada. De la mateixa manera, a les muntanyes la vegetació mediterrània sembla desplaçar-se cap a cotes més elevades. Aquestes no són les úniques manifestacions del canvi climàtic observades durant les darreres dècades, sinó que se'n poden destacar, entre altres, les següents: episodis de secada dels boscos més freqüents i severs, risc d'incendi més elevat i més emissió de compostos orgànics volàtils biogènics per part dels ecosistemes existents a Catalunya.

L'escalfament i la disminució de les precipitacions previstos per a les properes dècades, si es produeixen, afectaran la fisiologia, la fenologia, el creixement, la reproducció, l'establiment i, finalment, la distribució dels éssers vius, i per tant l'estructura i funcionament dels ecosistemes. De fet ja s'ha comprovat, en estudis experimentals que simulen aquest escalfament i aquesta sequera, com unes espècies resulten més afectades que altres, amb la qual cosa se n'altera l'habilitat competitiva i s'acaba alterant la composició de la comunitat. S'ha observat, per exemple, una disminució de la diversitat dels nostres matollars. En els casos més extrems, les poblacions d'algunes espècies es troben en perill per la sinergia entre l'estrès produït pel canvi climàtic, que fa inadequats els hàbitats en què viuen, i la fragmentació del territori, que en dificulta la migració cap a hàbitats amb condicions més adients per a la seva supervivència.

A més d'aquests canvis estructurals, en aquests estudis també s'han constatat canvis funcionals

com, per exemple, la disminució de l'absorció de CO<sub>2</sub> produïda per les sequeres o un increment en el ritme de pèrdua de nutrients -a través dels lixiviat- com a conseqüència de la possible intensificació dels episodis de pluja produïda per l'escalfament del clima. Aquests canvis afecten i afectaran els múltiples serveis proporcionats pels ecosistemes terrestres, tant els de caràcter productiu (subministrament de béns naturals renovables com ara aliments, medicines, productes derivats de la fusta, caça, bolets, pastures, etc.) com ambiental (manteniment de la biodiversitat, regulació de la composició atmosfèrica i el clima, conservació dels sòl i l'aigua, emmagatzematge de carboni, etc.) i social (usos recreatius, educatius i de lleure, valors tradicionals culturals, turisme i excursionisme, etc.). Un exemple d'això podria ser el paper de molts dels nostres ecosistemes terrestres com a embornals de carboni, el qual podria veure's seriosament compromès durant les properes dècades.

En els propers anys, i per tal de pal·liar tant els efectes del canvi climàtic com l'augment de CO<sub>2</sub> atmosfèric, les polítiques d'aforestació d'espais agrícoles abandonats i de reforestació de zones pertorbades haurien de tenir en compte les condicions que s'estan projectant per al futur immediat. Entre aquestes destaca la d'una decreixent disponibilitat hídrica com a conseqüència tant de la disminució de les precipitacions i/o l'augment de l'evapotranspiració potencial, com de la major demanda d'uns ecosistemes més actius per l'augment de CO<sub>2</sub> i de la temperatura. La gestió dels espais forestals, i dels naturals en general, hauria d'incorporar una planificació a gran escala que considerés la combinació d'espais de tipus divers, així com el seu múltiple ús i l'efecte de les pertorbacions (com, per exemple, els incendis forestals).



### **B9.1. Estudis paleoecològics, històrics, observacionals, experimentals i de modelització en el temps i en l'espai a Catalunya**

L'efecte d'hivernacle està produint i sembla que ha de produir un augment de la temperatura i de l'eixut a Catalunya (Peñuelas, 1993; Piñol et al. 1998; IPCC, 2001; Peñuelas et al., 2002). Per conèixer millor en quin grau s'alteren el funcionament i l'estructura dels ecosistemes mediterranis, s'estan duent a terme un nombre creixent d'estudis, les condicions experimentals dels quals s'intenta que s'apropin tant com sigui possible a les naturals, i s'aprofiten els avenços tecnològics per aplicar-los a les diferents escales temporals i espacials que puguin donar una idea de l'abast de l'alteració dels processos (Peñuelas, 2001).

L'estudi dels efectes que aquests canvis climàtics tenen sobre els ecosistemes terrestres de Catalunya es porta a terme mitjançant cinc tipus d'activitats que recorren diferents escales temporals. Abasten des dels períodes més remots al futur més immediat, tot passant pels períodes històrics més recents:

- 1) L'estudi paleoecològic de testimonis sedimentaris d'èpoques pretèrites, des de milions a milers d'anys enrera.
- 2) L'estudi de material històric divers, com ara espècimens d'herbari, peces de museu, arxius, anells dels arbres, etc., corresponents als darrers segles.
- 3) L'estudi dels canvis ecofisiològics, biogeoquímics i demogràfics dels ecosistemes mediterranis en resposta a les condicions climàtiques canviants de les darreres dècades i anys.
- 4) L'estudi experimental dels ecosistemes mediterranis sota condicions més o menys controlades, que simulen els canvis previstos pels models climàtics per a les properes dècades.
- 5) La modelització dels canvis passats i futurs, en l'espai i en el temps.

Els estudis paleoecològics de testimonis sedimentaris mostren els canvis ecosistèmics associats als canvis climàtics d'èpoques passades com l'holocè recent. Destaquen per la possible similitud amb el canvi que ara vivim les transicions de períodes humits a més secs, amb canvis importants de la vegetació i el desenvolupament de processos erosius, com el que va tenir lloc després de l'òptim climàtic de fa 5-6.000 anys, especialment evident en zones àrides i càlides com les del sud de la península Ibèrica o, més a prop nostre, a Menorca i Mallorca (Peñuelas, 2001), que il·lustren com poden ser els escenaris futurs si continua el canvi climàtic que vivim i el previst pels models de l'IPCC.

Els estudis d'èpoques més properes, els darrers segles, duts a terme amb anells dels arbres i amb materials d'herbari recollits als Països Catalans han mostrat canvis en la morfologia i fisiologia de les plantes produïts en paral·lel als canvis atmosfèrics i climàtics. S'ha comprovat, per

exemple, que en els darrers dos segles la densitat estomàtica ha disminuït en un 21% i la discriminació del  $^{13}\text{C}$  en un 5,2% en el conjunt de catorze espècies estudiades, cosa que indica una possible adaptació a les condicions més càlides i àrides de l'actualitat mitjançant una eficiència més elevada en l'ús de l'aigua (Peñuelas i Matamala, 1990; Peñuelas i Azcón-Bieto, 1992).

A part d'emprar eines paleoecològiques i històriques per analitzar els efectes del canvi climàtic al llarg del temps, l'estudi d'aquest fenomen i les seves conseqüències requereix anar ascendint successivament en l'escala espacial, des de la fulla fins l'ecosistema, la regió i el globus terraqüi sencer. Per estudiar què passa a escala regional i planetària s'utilitzen tècniques de teledetecció, que es basen en el fet que la llum reflectida, després d'incidir en un material, presenta diferents característiques, en funció del tipus de material i del seu estat (Peñuelas i Filella, 1998). Els espectroradiòmetres instal·lats en avions o en satèl·lits poden mesurar la biomassa verda per la proporció de radiació reflectida en l'infraroig i en el roig. Aquesta és la manera com, des de fa unes dècades, s'estudia l'evolució anual de les masses vegetals. Tanmateix, l'estricta estimació de la biomassa, malgrat el seu gran interès, no satisfà del tot les necessitats dels ecòlegs. Interessa mesurar, no solament la biomassa, sinó també el funcionament de la vegetació i, si pot ser, el dels ecosistemes.

Ara es disposa d'espectroradiòmetres més sensibles, capaços de mesurar amb unes resolucions espectral i espacial molt elevades i aportar, d'aquesta manera, informació sobre el contingut hídric i la fisiologia de la vegetació (Peñuelas i Filella, 1998). Tot això és especialment interessant, per exemple, per a l'estudi dels ecosistemes mediterranis, que sovint presenten la biomassa foliar verda durant tot l'any. Les noves eines permeten apreciar la pràctica inactivitat de l'alzinar o dels pinars a l'estiu o la seva màxima activitat a la primavera, quan hi ha aigua disponible, així com també els canvis interannals. D'aquesta

manera, doncs, en l'estudi dels efectes ecològics del canvi climàtic i dels altres components del canvi global, com ara els canvis en els usos del sòl, convé no desapropiar les noves possibilitats obertes pels avenços tecnològics.

Entre aquests, hi ha els que estan permetent, tornant a l'escala temporal, estudiar experimentalment i amb models el que pot passar als ecosistemes en cas que continui el canvi climàtic, com preveuen els models climàtics de l'IPCC. I en aquesta mateixa escala temporal, interessa repassar el que ha tingut lloc en els ecosistemes terrestres de Catalunya, durant les darreres dècades i els darrers anys, en resposta i en interacció amb aquest fenomen que es coneix com a «canvi climàtic» i que està associat al «canvi atmosfèric» produït per l'activitat humana.

#### **B9.2. El canvi climàtic de les darreres dècades: escalfament i eixutesa**

La Terra s'ha escalfat, de mitjana, entre 0,6 i 0,7 °C durant les darreres dècades, tot i que en molts punts de Catalunya l'augment ha superat amb escreix 1°C (Piñol et al., 1998; IPCC 1996, 2001; Peñuelas et al., 2002). Aquest és, potser, el símptoma més clar que el planeta accentua la seva activitat biogeoquímica. La població d'una de les seves espècies, la humana, i l'ús que aquesta espècie fa dels recursos i de l'energia en les seves activitats exosomàtiques, com el transport o la indústria, han seguit creixent exponencialment. Això ha generat –i continua produint– tota una sèrie de canvis de caràcter global entre els quals destaca, pels seus efectes sobre els organismes i els ecosistemes, aquest escalfament (Peñuelas, 1993).

Com a conseqüència de l'absorció de la radiació infraroja pels gasos amb efecte d'hivernacle (com ara el  $\text{CO}_2$  o el metà) i del seu increment continuat, pràcticament tots els models preveuen que aquest escalfament s'accentui en les properes dècades. Centenars de climatòlegs, ecòlegs, economistes, geògrafs, químics, advocats i altres professionals varen generar el tercer informe del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el



Canvi Climàtic (IPCC, 2001), algunes conclusions del qual ja s'esmenten en altres capítols d'aquest informe, però que aquí mereixen atenció.

Les proves de l'existència d'un escalfament d'àmbit planetari i d'altres canvis en el sistema climàtic són, actualment, encara més clares i contundents que les recollides al segon informe elaborat per l'IPCC l'any 1996. Les dues últimes dècades han estat les més càlides de l'últim mil·lenni. La superfície gelada de l'Àrtic ha disminuït un 15% en els darrers 50 anys. El nivell del mar ha pujat uns 15 cm aquest segle passat. El règim de precipitacions ha canviat en algunes regions i ha augmentat la freqüència i la intensitat d'alguns fenòmens, com «*El Niño*». Sembla que tots aquests canvis s'accentuaran en les properes dècades, ja que l'atmosfera segueix canviant a causa de les activitats antròpiques (que creixen exponencialment i segueixen basades, en bona part, en la combustió de materials fòssils).

Pel que fa a la temperatura global, es preveu un augment d'1 a 5°C durant el segle XXI, en funció de l'evolució de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle. A Catalunya, la temperatura mitjana de molts llocs ha augmentat més d'1°C durant els últims 50 anys i sembla que les condicions de bonança meteorològica es posen de manifest abans. Les temperatures que fa 50 anys es registraven a primers d'abril, ara es donen a primers de març (Peñuelas et al., 2002).

Tot i que la precipitació no ha disminuït en les darreres dècades (Piñol et al., 1998; Peñuelas et al., 2002), l'augment de temperatura ha produït un increment de l'evapotranspiració, de manera que moltes de les localitats i regions mediterrànies són ara més càlides i més seques que en les dècades anteriors. Així, per exemple, l'observatori de Roquetes ha registrat un increment de 13 mm en l'evapotranspiració potencial al llarg del segle XX, mentre que la humitat relativa ha disminuït 0,85% per dècada (Piñol et al., 1998). Tot i que les prediccions climàtiques, especialment les relatives a la precipitació, es fan extre-

madament complexes a escala local i regional, l'increment de temperatures previst per molts models de circulació global a la regió mediterrània per a mitjans del segle XXI –d'entre 1 i 3°C–, augmentaran encara més l'evapotranspiració.

### B9.3. Els canvis temporals i l'alteració dels cicles vitals dels éssers vius

L'activitat de l'espècie humana, així com la de tots els organismes vius, està fortament influïda per la temperatura. Per tant, és d'esperar que un canvi en les condicions climàtiques produeixi alteracions d'aquesta activitat (figura B9.1).

No ha d'estranyar, doncs, que l'escalfament s'hagi traduït ja en canvis significatius en els cicles vitals de plantes i animals (Peñuelas i Filella, 2001a). Cal tenir present que el pas per les diferents fases d'aquests cicles depèn, entre altres factors, de la temperatura acumulada, d'allò que el biòlegs anomenem *graus-dia*, és a dir, del total d'energia requerida per un organisme per tal de poder-se desenvolupar i passar d'un estadi a un altre del seu cicle vital.

Les evidències d'aquestes alteracions en els cicles vitals són fàcilment observables per tots aquells que segueixin la natura i tinguin uns quants anys i, de fet, ja s'han descrit a diverses regions del món, des dels ecosistemes freds i humits fins als càlids i secs, a partir de l'observació dels registres fenològics disponibles. Aquests canvis fenològics (la fenologia és la ciència que estudia els cicles vitals dels organismes) s'han convertit en el símptoma més clar que el canvi climàtic ja està afectant la vida.

Catalunya és un dels llocs on els canvis fenològics observats són més importants (Peñuelas et al., 2002). No obstant això, les observacions fetes en terres catalanes (figura B9.2) són comparables a altres fetes arreu del món –tot i que cal precisar que aquest tipus d'observacions són més abundants als països rics, amb un nombre d'investigadors més important i més tradició científica (Peñuelas i Filella, 2001a).

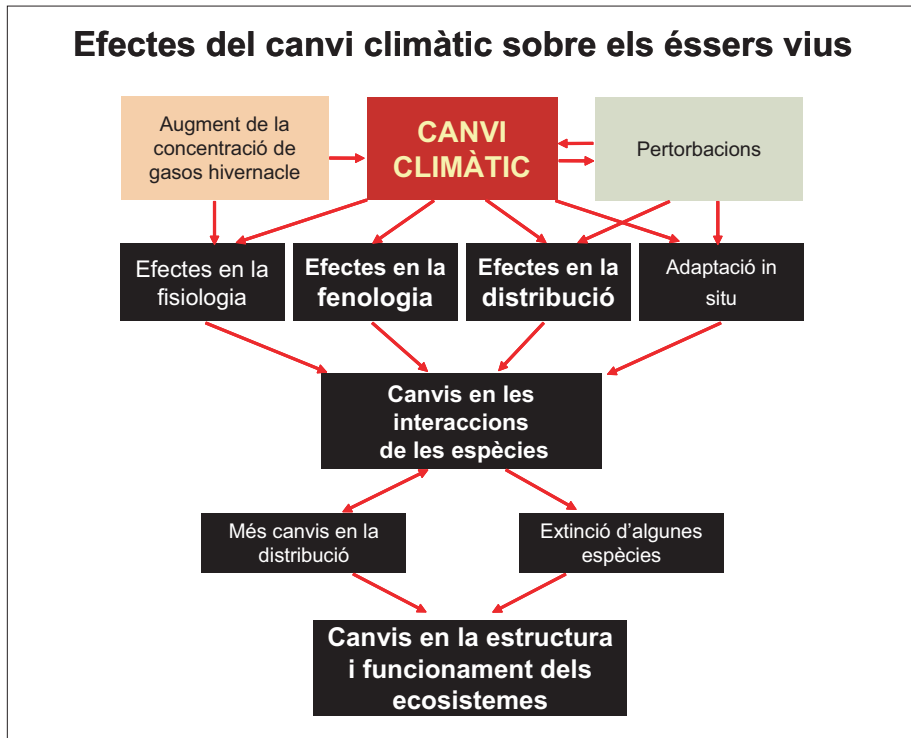


Figura B9.1. Efectes biològics del canvi climàtic.  
 Font: elaboració pròpia, a partir de l'estudi de Hughes (2000).

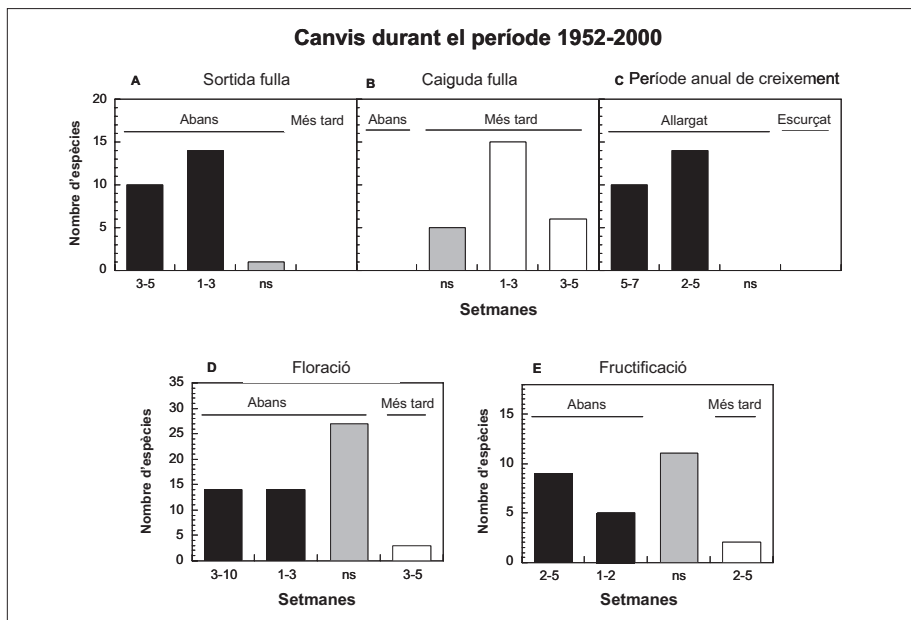


Figura B9.2. Freqüència d'espècies vegetals i animals amb fenologia alterada durant les darreres cinc dècades (període 1952-2000) a Cardedeu (Vallès Oriental).  
 Font: Peñuelas et al., 2002.

Com recull la figura B9.2, actualment a Catalunya les fulles dels arbres surten, de mitjana, uns 20 dies abans que no pas fa una cinquantena d'anys. D'aquesta manera, doncs, sembla que la pomera, l'om o la figuera treuen les fulles amb un mes d'antelació i que l'ametller i el pollancre ho fan uns quinze dies abans. N'hi ha d'altres, però, com el castanyer, que semblen immutables al canvi de temperatura (segurament són més dependents d'altres factors com el fotoperíode o la disponibilitat hídrica). D'altra banda, les plantes també estan florint i fructificant, de mitjana, 10 dies abans que fa 30 anys.

Els cicles vitals dels animals també estan sent alterats per aquest procés de canvi. Així, per exemple, l'aparició d'insectes, que passen pels diferents estadis larvaris més ràpidament en resposta a l'escalfament, s'ha avançat 11 dies. Aquest fenomen haurà estat observat pels amants de les papallones, ja que actualment aquestes apareixen abans, són més actives i allarguen el seu període de vol (Stefanescu et al., 2004), tal i com mostra la figura B9.3.

Tota aquesta activitat prematura de plantes i animals pot posar-los en perill per les gelades tardanes. No obstant això, la freqüència d'aquestes gelades ha disminuït en aquest ambient cada cop més calent. Per exemple, fa cinquanta anys a Cardedeu es donaven unes 60 gelades anuals, i ara han passat tan sols a 20 (Peñuelas et al., 2002). Això implica, per tant, que també hagi disminuït el risc de malmetre fulles i flors joves. En molts indrets del planeta s'han descrit respostes similars en l'avançament, d'entre 3 i 4 dies per dècada, de les fenofases de plantes i animals (invertebrats, amfibis, ocells, etc.) durant la primavera (Peñuelas i Filella, 2001a; Walther et al., 2002; Root et al., 2003; Parmesan i Yohe, 2003). Així doncs, sembla que es tracta d'un fenomen general, amb la variabilitat regional, local i específica pròpia de tot fenomen biològic (Peñuelas et al., 2004).

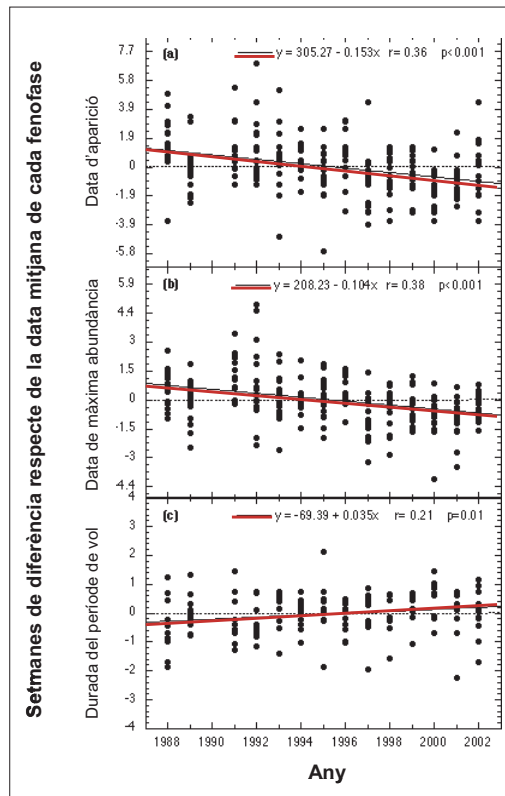


Figura B9.3. Canvis en l'aparició, el pic d'abundància i la durada del vol de 13 espècies de papallones als Aiguamolls de l'Empordà durant els darrers 15 anys.

Font: Stefanescu et al., 2003.

### B9.3.1. Les alteracions de les comunitats

Tots aquests canvis fenològics no són simples indicadors del canvi climàtic, sinó que tenen una importància ecològica crítica, ja que afecten l'habilitat competitiva de les diferents espècies, la seva conservació, i, per tant, l'estructura i el funcionament dels ecosistemes.

Com que la natura no és homogènia, les respostes a l'escalfament són diferents depenent de l'espècie (i àdhuc dels individus). Per exemple, el vern i la ginesta floreixen amb més d'un mes d'avançament, les roselles ho fan quinze dies abans, les alzines una setmana, l'olivera no s'immuta i el pi pinyoner fins i tot triga uns dies més. Aquestes respostes tant heterogènies al canvi climàtic poden produir importants desincronitza-

cions en les interaccions entre les espècies, per exemple entre les plantes i els seus pol·linitzadors, o entre les plantes i els seus herbívors, i alterar així l'estructura de les comunitats.

Un exemple paradigmàtic de les desincronitzacions entre nivells tròfics es pot trobar en el cas de les aus migratòries, els hàbits de les quals sembla que també ha estat alterat pel canvi climàtic. Davant de l'avançament detectat en la floració i la fructificació de les plantes, així com en l'aparició dels insectes, i, per tant, l'avançament en la disponibilitat de menjar per a les aus, s'esperaria una arribada més primerenca de les aus migratòries. Paradoxalment, això no és així, i l'arribada d'algunes aus tan comunes i populars com el rossinyol, l'oreneta, el cucut o la guatlla sembla que s'està retardant de mitjana dues setmanes respecte a fa trenta anys (Peñuelas et al., 2002).

Aquest retard segurament ve determinat pel canvi climàtic que s'està produint al lloc d'on parteixen (les regions subsaharianes) o a les terres que creuen en la seva ruta migratòria. Així, la sequera i la desforestació del Sahel –i la consegüent manca d'aliment– poden dificultar la preparació del seu viatge i afavorir aquesta arribada més tardana.

Tots aquests canvis poden representar una amenaça per a algunes aus migratòries, que arriben en un moment inapropiat per explotar l'hàbitat, ja que han de competir amb les espècies que s'han quedat durant l'hivern i es troben en millor estat competitiu. De fet, el declivi en el nombre d'aquestes aus migratòries que arriben a Europa en els darrers anys pot ser-ne una conseqüència. D'altra banda, hi ha espècies abans migratòries que aprofiten que aquí l'hivern és cada vegada més suau i ja no se'n van de la península. Aquest es el cas de la puput o de les cigonyes.

### **B9.3.2. Les alteracions en l'activitat dels ecosistemes i la biosfera**

Quan s'estudien els canvis fenològics a escala global (Peñuelas i Filella, 2001a), s'observen al-

teracions tan importants com ara l'augment, en un 20%, de l'activitat biològica del planeta en els últims 30 anys. Aquest increment és atribuïble, en gran part, a aquest allargament fenològic del període productiu, i és apreciable tant en les imatges dels satèl·lits d'observació de la Terra com en les dades de concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>.

Per al seguiment de les masses vegetals des de l'espai s'empra un índex de vegetació normalitzat conegut per l'acrònim anglès NDVI, que es basa en el quocient entre la radiació infraroja i la roja que la superfície terrestre reflecteix cap a l'espai. Com més gran és aquest quocient, més gran és la biomassa verda. Doncs bé, aquest índex NDVI corrobora les dades fenològiques dels observadors terrestres i mostra com en els darrers 20 anys l'estació de creixement dels vegetals s'ha allargat 18 dies a Euràsia i com això s'ha traduït en un augment de la biomassa verda, com a mínim a latituds superiors als 40° (Myneni et al., 1997). L'increment de la productivitat vegetal de les darreres dècades que s'havia atribuït a l'efecte fertilitzador del CO<sub>2</sub> i de les deposicions de nitrogen pot atribuir-se, també en part, a aquest augment de temperatura i a aquest allargament de l'estació de creixement (activitat vegetativa).

Tot això també ve corroborat per les dades de concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>, que mostren un augment de l'amplitud de l'oscil·lació estacional de CO<sub>2</sub> en les últimes dècades a causa d'una disminució més gran de la concentració de CO<sub>2</sub> durant la primavera (Keeling et al., 1996). Aquest allargament de l'estació de creixement juga un paper molt important en la fixació global del carboni, la quantitat de CO<sub>2</sub> de l'atmosfera i en els cicles de l'aigua i dels nutrients, i, per tant, té conseqüències molt importants en el funcionament dels ecosistemes i en el balanç de carboni, ara tan important a la llum del Protocol de Kyoto.

#### B9.4. Altres canvis als ecosistemes terrestres en resposta al canvi climàtic i a les interaccions d'aquest amb altres components del canvi global

A Catalunya, els ecosistemes terrestres presenten una gran variabilitat climàtica, una complexitat topogràfica important, uns gradients en els usos del sòl i en la disponibilitat d'aigua molt marcats i, també, una biodiversitat molt elevada. Segurament tot això explica la seva especial sensibilitat als canvis atmosfèrics i climàtics, així com als canvis en usos del sòl, demogràfics i econòmics.

El canvi climàtic augmenta l'estress hídric de la vegetació mediterrània, la qual ja acostuma a viure al límit de les seves possibilitats, com en el cas d'alguns alzinars i pinedes que presenten taxes d'evapotranspiració quasi iguals a les de precipitació. A més d'accentuar la poca disponibilitat d'aigua, l'escalfament accentua altres trets característics dels ecosistemes terrestres de Catalunya, com ara els incendis forestals o l'emissió de compostos orgànics volàtils. I, a més, el canvi climàtic interactua amb altres components del canvi global, com ara el mateix augment de la concentració de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera.

##### B9.4.1. Increment en la freqüència de les sequeres severes

Els models de circulació general (GCM) preveuen, per a Catalunya, un augment de la freqüència i intensitat dels períodes de sequera (IPCC, 2001). Com a exemple dels efectes de períodes càlids i secs es pot prendre l'any 1994, molt calorós i sec, que va afectar profundament la vegetació mediterrània, tot danyant de forma molt severa molts boscos i matollars de la península Ibèrica (així, el 80% de les 190 localitats peninsulars estudiades presentaven espècies danysades, Peñuelas et al., 2001b).

Les alzines, per exemple, es van assecar en moltes localitats de Catalunya (Lloret i Siscart, 1995).

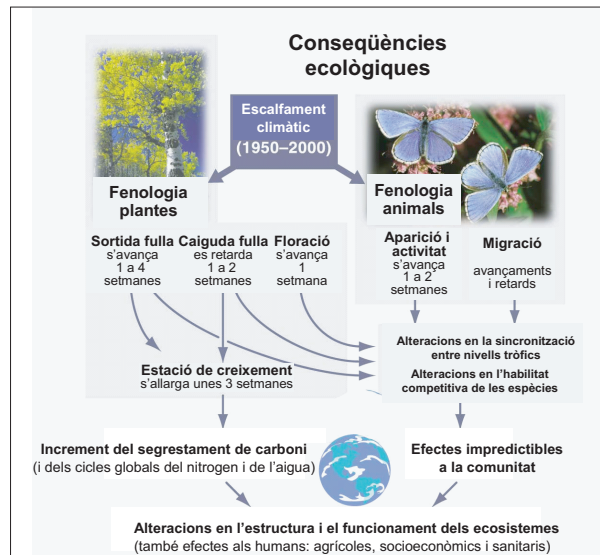


Figura B9.4. Efectes ecològics dels canvis fenològics produïts pel canvi climàtic. Font: Peñuelas i Filella, 2001a.

Estudis isotòpics amb C<sup>13</sup> i N<sup>15</sup> van mostrar que durant els anys posteriors aquests alzinars van romandre afectats, de manera que van utilitzar menys l'aigua que tenien disponible i es va afavorir la pèrdua dels nutrients del sòl (Peñuelas et al., 2000), una conseqüència secundària greu tenint en compte que aquests ecosistemes solen estar limitats pels nutrients (principalment fòsfor als sòls calcaris i nitrogen als silícics) (Rodà et al., 1999, Sardans et al., 2004).

La severitat diferencial dels efectes sobre els diversos boscos del país va venir donada, entre altres, pels factors següents:

- 1) L'orientació dels vessants (més afectació als solells) (Peñuelas et al., 2000)
- 2) La litologia del sòl (més afectació als sòls profunds i penetrables per les arrels com, per exemple, els esquists) (Lloret i Siscart, 1995; Peñuelas et al., 2000)
- 3) L'espècie dominant (afectació més important d'alzines que de falsos aladerns, que creixen menys però són més resistents a l'embolisme, utilitzen més eficientment l'aigua i dissipen

millor l'excés d'energia (Peñuelas et al., 1998)

- 4) La gestió forestal (els boscos aclarits són menys afectats que els densos) (Gràcia et al., 1999a).

El grau d'afectació fou diferent depenent del tipus funcional i de la història evolutiva de les diverses espècies (Peñuelas et al., 2001b). Els gèneres mediterranis *Lavandula*, *Erica*, *Genista*, *Cistus* i *Rosmarinus*, en la seva majoria arbustius i evolucionats sota les condicions climàtiques mediterrànies, és a dir, posteriorment als 3,2 milions d'anys del Pliocè, foren aparentment més afectats per la sequera que els gèneres evolucionats amb anterioritat, com els *Pistacia*, *Olea*, *Juniperus*, *Pinus* i *Quercus*, majoritàriament arboris. Tot i així, els gèneres mediterranis es recuperaren molt millor després d'uns anys de més disponibilitat hídrica. Un gènere al·lòcton com l'*Eucalyptus* fou fortament danyat per la sequera i no es recuperà en els anys successius. Els gèneres mediterranis post-Pliocè semblen més adaptats per respondre a un ambient difícil de predir amb una gran variabilitat estacional i interannual i subjecte a pertorbacions freqüents.

Entendre aquestes respostes és important per preveure la composició futura de les comunitats en cas que el canvi climàtic continuï. Aquest aspecte es discutirà en aquest mateix capítol, quan es repassin els estudis experimentals simuladors del futur immediat (apartat B4.7).

#### **B9.4.2. Increment de la freqüència i intensitat dels incendis forestals**

Aquestes condicions més càlides i més àrides, junt amb altres fenòmens relacionats amb el canvi global, com l'increment de biomassa i d'inflamabilitat associat a l'augment del CO<sub>2</sub>, els canvis en els usos del sòl, com ara l'abandonament de terres de cultiu seguit d'un procés de forestació i acumulació de combustible, i/o les pràctiques i activitats del creixent nombre de ciutadans no avesats al bosc, augmenten la freqüència i la intensitat dels incendis forestals. Els

incendis, que han augmentat al llarg del segle xx (Piñol et al., 1998), ja constitueixen una de les pertorbacions més importants en els ecosistemes mediterranis (Terradas, 1996).

Els boscos i matollars mediterranis, caracteritzats per un fort eixut estival, són ecosistemes propensos als incendis. Ara bé, per tal que es produeixin els incendis fa falta un punt d'ignició. Actualment, a Catalunya només un 7% dels incendis tenen un origen natural, i la immensa majoria de les ignicions són provocades per les activitats humanes, sigui per negligència, accident, o intencionadament (Rodà et al., 2003).

La relació entre el foc i la vegetació és complexa. Així, el foc pertorba intensament la vegetació i el paisatge: filtra les espècies vegetals i animals que poden persistir, crea espais oberts, canvia l'estructura de l'hàbitat i l'oferta alimentària per a la fauna i determina mosaics espacials de regeneració que, segons l'escala d'espai i la recurrència dels incendis, poden generar més diversitat. Per altra banda, el foc ocasiona pèrdues de nutrients de l'ecosistema, afecta negativament les espècies de requeriments forestals estrictes i les que no tenen mecanismes adequats de persistència o dispersió, i pot produir una simplificació en la composició i l'estructura de les comunitats.

La resposta de les plantes varia molt segons el tipus i durada de l'incendi, la capacitat de regeneració de l'espècie (des de rebrotadores a germinadores) o l'estat previ a l'incendi. Tot i així, els efectes sobre la vegetació són bastant previsibles. Per exemple, si augmenta el nombre d'incendis, augmenta l'expansió d'espècies heliòfiles, intolerants a l'ombra i que requereixen espais oberts. En canvi, disminueix la presència de les umbròfiles i els focs acaben per mantenir comunitats en estadis successional primers (Terradas, 1996).

De fet, a totes les regions mediterrànies del món els incendis són considerats un factor ecològic i evolutiu dominant. La vegetació mediterrània ha

evolució amb els incendis, fins al punt que poden ser fins i tot beneficiosos per a la seva regeneració. No obstant això, l'increment que s'està produint en la recurrència dels incendis pot provocar que les comunitats no tinguin temps de recuperar-se, cremant-se repetidament abans que els nous individus puguin arribar a adults i reproduir-se. Això és especialment greu en algunes àrees de Catalunya, on en els darrers 20 anys s'han experimentat fins a 5 incendis (Díaz-Delgado et al., 2002), tal i com mostra la figura B9.5.

En qualsevol cas, els incendis contribueixen a reduir el contingut de matèria orgànica del sòl, la qual, a la seva vegada, pot disminuir la mida i l'estabilitat dels agregats del sòl. A més, com que hi ha una disminució de la coberta vegetal, pot reduir-se la infiltració de l'aigua al sòl i incre-

mentar-se l'escorrentia superficial. Tot plegat facilita l'erosió del sòl (vegeu previsions futures a l'apartat B9.6.3).

Des del punt de vista social i econòmic, els incendis forestals posen en perill vides humanes i propietats, eliminen durant molt de temps les rendes obtingudes de la fusta i alteren paisatges preuats sentimentalment i econòmicament (Rodà et al., 2003).

El risc d'incendis intensos i de conseqüències no desitjades és, doncs, molt alt als ecosistemes terrestres de Catalunya, sobretot als més mediterranis i als més madurs, on la fracció de combustible mort (amb menys humitat) augmenta significativament. Per això, s'han proposat diverses estratègies de gestió contra els focs intensos: pràctiques de crema freqüent podrien ser

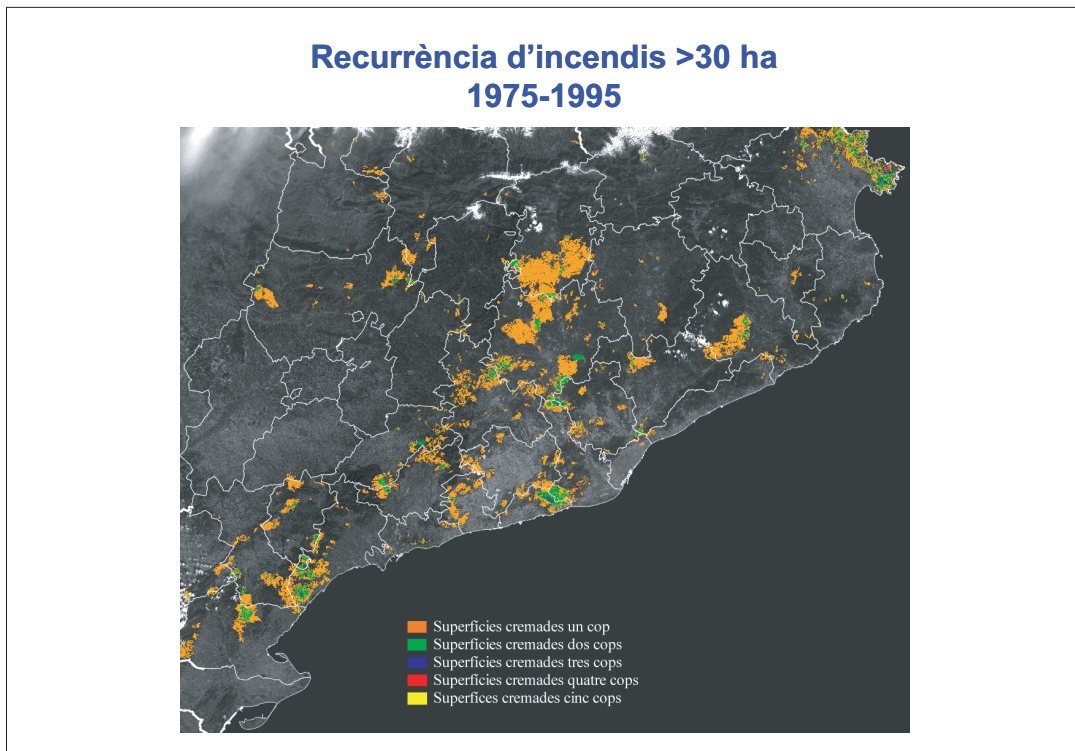


Figura B9.5. Recurrència dels incendis forestals a Catalunya entre els anys 1975 i 1995.  
Font: Díaz-Delgado et al., 2002.

adients en el cas de les comunitats joves, mentre que tallar mecànicament seria més adequat en el cas de les més velles i desenvolupades. S'han dut a terme diversos estudis comparant la recuperació després de l'incendi i de la tala mecànica, però les respostes no coincideixen i demostren la necessitat de dur a terme estudis en cada ecosistema específic. El coneixement de la dinàmica de la recuperació a curt i mitjà termini és bàsic per a la gestió de la comunitat, tant si el que es vol és preservar-la com si el que es vol és afavorir el progrés cap a estadis més madurs o mantenir els estadis inicials per a preservar la diversitat dels ecosistemes mediterranis.

#### **B9.4.3. Increment de l'emissió de compostos orgànics volàtils**

L'augment de temperatura té molts altres efectes directes sobre l'activitat dels organismes vius. Un que té una certa importància des del punt de vista ambiental és l'augment exponencial de les emissions biogèniques de compostos orgànics volàtils (COV), les quals afecten la química atmosfèrica, no solament pel que fa al cicle del carboni (emissions d'unes 1500 Tg C any<sup>-1</sup>) o la formació d'aerosols, sinó pel seu paper en l'equilibri oxidatiu de l'aire (nivells d'OH, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, etc.) (Peñuelas i Llusia, 2001, 2003).

Aquestes emissions són el resultat de la difusió dels COV en un gradient de pressió de vapor, des de les altes concentracions als teixits on es produeixen fins a l'aire circumdant, on les concentracions són baixes com a conseqüència de l'extrema reactivitat dels COV. Per tant, les emissions són controlades pels factors que alteren la concentració tisular, la pressió de vapor o la resistència a la difusió cap a l'atmosfera. La temperatura incrementa exponencialment l'emissió d'aquests COV en activar la seva síntesi enzimàtica i la seva pressió de vapor i en disminuir la resistència a l'emissió. Per altra part, la sequera redueix les emissions com a conseqüència de la falta de carbohidrats i ATP i de la disminució de la permeabilitat de la cutícula a l'intercanvi gasós.

Per tant, caldrà veure quin és el resultat final d'aquest antagonisme entre escalfament i sequera en un tema tant important ambientalment com és l'emissió biogènica de COV. A banda de la temperatura i de la disponibilitat hídrica, altres factors lligats amb el canvi climàtic i amb el canvi global controlen aquestes emissions. Entre aquests factors, un de sorprenent és la concentració d'ozó troposfèric, un dels productes d'aquests COV, en el que seria un fenomen de retroacció positiva de la contaminació per ozó (Llusia et al., 2002).

Lligada amb el canvi climàtic, una de les funcions més importants que semblen tenir alguns d'aquests COV (com els terpens) en la fisiologia vegetal és la d'actuar com a elements termoprotectors. El *Quercus ilex* empraria aquests compostos com a estabilitzadors de les membranes cel·lulars i, més concretament, d'aquelles membranes íntimament relacionades amb els fotosistemes, així com també com a desactivadors dels radicals oxidats per protegir-se de les altes temperatures de l'estiu (Peñuelas i Llusia, 2002).

No obstant això, a més de refrigerar la planta, aquestes emissions de COV podrien retroalimentar negativament l'escalfament del propi clima atmosfèric, en actuar com aerosols que disminueixen la irradiància. Aquest és un aspecte a estudiar amb més profunditat, perquè també, d'altra banda, podrien incidir positivament en l'escalfament a través del seu efecte d'hivernacle directe, en absorbir la radiació infraroja, i indirecte, en allargar la vida al metà i altres gasos amb efecte d'hivernacle (Peñuelas i Llusia, 2003). Aquest és un exemple més de l'important paper que juguen els ecosistemes sobre el mateix clima i el possible canvi climàtic, apart del més conegut i important efecte sobre el balanç del CO<sub>2</sub> a l'atmosfera (figura B9.6).

#### **B9.4.4. Increment de la presència de nitrats a les aigües**

Un dels processos biogeoquímics que és font de preocupació arreu del món i, en especial, a mol-





Sistemes naturals: ecosistemes terrestres Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Santi Sabaté i Carles Gràcia

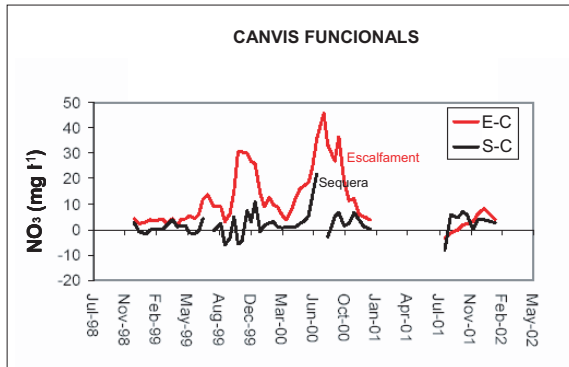


Figura B9.7. Exemple de canvi funcional ecosistèmic produït pel canvi climàtic a un matollar de bruguerola holandès: alliberament de nitrats a l'aigua del sòl en resposta a un escalfament del voltant d'un grau i a una disminució del 33% de la humitat dels sòl. Es representa la diferència respecte a parcel·les control (E-C diferència entre escalfament i control; S-C diferència entre sequera i control). Font: elaboració pròpia (basada en Emmet et al., 2003).

diades sota concentracions creixents de CO<sub>2</sub> han mostrat taxes fotosintètiques més elevades, més productivitat i concentracions tissulars de nitrogen més petites, si més no en els estudis duts a terme a curt termini i amb plantes joves (Peñuelas et al., 1995; López et al. 1997). També redueixen la transpiració (menys conductància estomàtica i, de vegades, un nombre d'estomes més reduït) i augmenten, així, l'eficiència d'ús de l'aigua, entesa com els grams de biomassa assimilats per gram d'aigua transpirada. L'efecte últim de l'augment de CO<sub>2</sub>, però, depèn de la interacció amb altres factors ambientals: la temperatura, la radiació, la sequera, la disponibilitat de nutrients o la presència de contaminants atmosfèrics (Peñuelas, 1993; López et al. 1997) (figura B9.8).

Per exemple, els efectes hídrics semblen més accentuats en les condicions de sequera mediterrània que no pas en les pròpies del centre i nord d'Europa, i els efectes de l'ozó vénen moderats pel tancament estomàtic produït pel CO<sub>2</sub>. Les respostes al CO<sub>2</sub> són diferents depenent de les espècies (Peñuelas et al., 2001a) i àdhuc dels genotips (Castells et al., 2002), la qual cosa podria dur a canvis a nivell de comunitat a mesura que aquest gas augmenti.

De totes maneres, no està clar el que pot passar a llarg termini i en les complexes condicions dels ecosistemes. Cal ser prudents en l'extrapolació a partir d'experiments que han estat majoritàriament duts a terme en condicions molt controlades, amb plantes aïllades, joves i a curt termini. Per exemple, aquestes respostes podrien esmortir-se amb el temps. En algunes plantes hi ha hagut aclimatació de la fotosíntesi o han desaparegut les reduccions en les concentracions d'elements com el N després de sis anys de creixement amb una concentració elevada de CO<sub>2</sub> (Peñuelas et al., 1997). Tampoc hi ha una resposta única entre les espècies pel que fa a la química foliar (Peñuelas et al., 2001a).

Tot i així, la vegetació actual sembla presentar una eficiència més alta en l'ús de l'aigua i una concentració més petita de nitrogen i altres elements diferents del carboni que no pas la vegetació de fa uns decennis, tal com han posat de manifest els estudis morfològics, químics i isotòpics dels espècimens d'herbari de Catalunya (Peñuelas i Matamala, 1990; Peñuelas i Azcon-Bieto, 1992). Aquests estudis isotòpics indiquen, també, que els ecosistemes mediterranis podrien respondre a la demanda més gran de N, tot disminuint-ne les pèrdues, incrementant-ne la fixació i aprofitant la creixent fixació i deposició antropogènica (Peñuelas i Filella, 2001b).

#### **B9.5. Canvis estructurals i en la distribució espacial dels ecosistemes**

Tots aquests canvis funcionals en resposta al canvi climàtic i als canvis atmosfèrics poden acabar afectant l'estructura dels ecosistemes. Així, si s'accentuen les diferents respostes fenològiques entre les espècies, es repeteixen sovint fortes sequeres com la del 1994, els incendis augmenten i/o el CO<sub>2</sub> té efecte, es poden produir canvis importants en la composició i estructura dels ecosistemes terrestres del país.

Fins a quin punt tenen les plantes i animals ca-

pacitat per adaptar-se o aclimatar-se ràpidament a aquests canvis climàtics? Des d'un punt de vista evolutiu, les espècies tendeixen a ser bastant conservadores i a respondre a les perturbacions més amb la migració que amb l'evolució. A les muntanyes, les espècies poden respondre al canvi climàtic migrant verticalment distàncies curtes (per exemple, només cal pujar 500 metres per contrarestar un augment de 3°C).

Segons alguns estudis paleoecològics, a Catalunya i, en general a tot el planeta, ja s'han observat nombrosos desplaçaments de les àrees de distribució d'algunes espècies i formacions vegetals en resposta a canvis climàtics pretèrits. No obstant això, encara no hi ha gaire evidències com a resposta a l'escalfament actual. Cal recordar que aquests processos requereixen un temps. De totes maneres, recentment, s'ha comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny amb

la de l'any 1945 i s'ha pogut apreciar que els ecosistemes mediterranis guanyen terreny als temperats (Peñuelas i Boada, 2003), tal i com es mostra a la figura B9.9.

El canvi en les condicions climàtiques, progressivament més càlides i àrides, i els canvis en els usos del sòl, principalment l'abandonament de la gestió tradicional (com ara la pràctica desaparició dels incendis associats a la ramaderia, que ara estan prohibits al parc del Montseny), són a la base d'aquests canvis, en un exemple paradigmàtic de com interactuen els diferents components del canvi global.

Els estudis paleoecològics suggereixen que moltes espècies vegetals poden migrar amb suficient rapidesa com per adaptar-se al canvi climàtic, però només si existeixen ecosistemes contigus no pertorbats, la qual cosa posa de manifest la

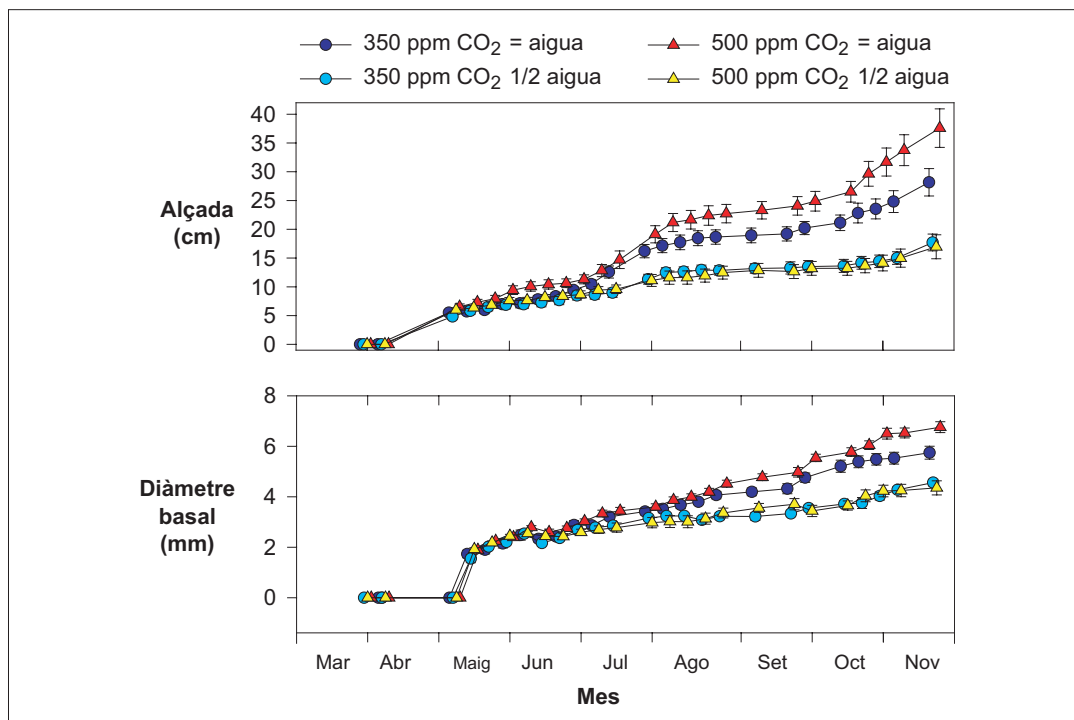


Figura B9.8. Creixement en alçada (cm) i diàmetre basal (mm) de plàntules d'alzina en condicions de CO<sub>2</sub> i aigua controlades. L'aigua es va dosificar reproduint el clima mediterrani de Prades (= aigua) o bé la meitat (1/2 aigua). El CO<sub>2</sub> es va mantenir a nivells de concentració de 350 i 500 ppmv. Font: López et al., 1997.

Sistemes naturals: ecosistemes terrestres Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Santi Sabaté i Carles Gràcia

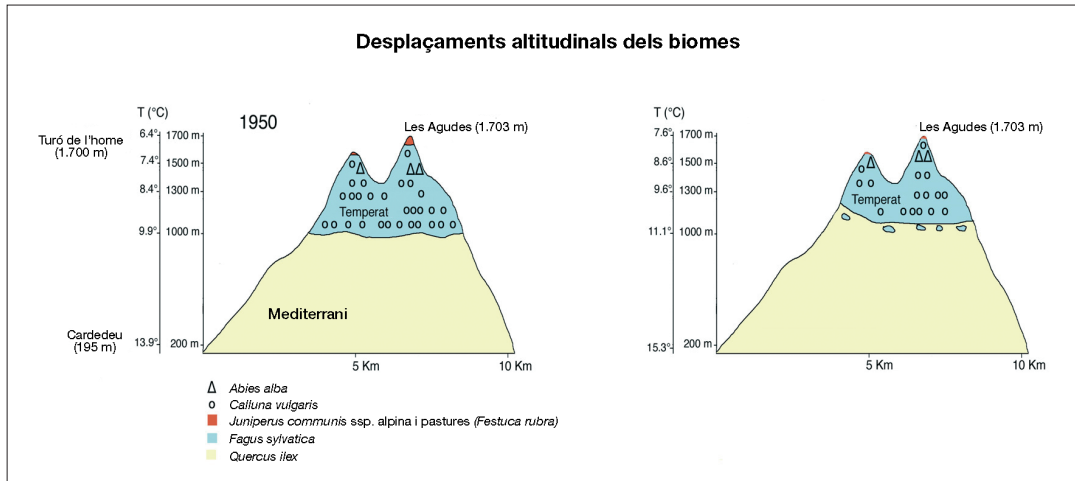


Figura B9.9. Esquema dels desplaçaments altitudinals de la vegetació del Montseny durant els darrers 50 anys.

Font: elaboració pròpia a partir de Peñuelas i Boada, 2003.

importància de la fragmentació dels ecosistemes naturals com un altre factor del canvi global. I la fragmentació és elevada a moltes contrades catalanes, com es pot observar si es mira una foto aèria de les comarques de Barcelona. Pel que fa a les muntanyes, la migració cap a altituds més elevades comporta una reducció concomitant en l'àrea total de cada hàbitat, per la qual cosa les espècies que requereixen àrees més extenses poden extingir-se.

Aquests efectes de l'escalfament no han d'estranyar, ja que és ben conegut que els règims climàtics determinen la distribució de les espècies i dels biomes a través dels dintells específics de cada espècie pel que fa a la temperatura i la disponibilitat d'aigua. I tot això no només fa referència a les plantes, perquè els animals no són pas menys sensibles. Al contrari, responen més ràpidament a causa de la seva mobilitat. D'aquesta manera, doncs, s'han documentat força desplaçaments d'espècies animals relacionats amb el clima, entre els quals es pot destacar els desplaçaments de 34 espècies de papallones amb distribució europea, incloent-hi àrees catalanes, cap al pol nord, d'entre 35 i 240 km, durant el segle XX (Parmesan et al., 1999).

### B9.6. El futur dels ecosistemes terrestres mediterranis davant el canvi climàtic previst per a les properes dècades

Entre els ecosistemes terrestres del país, els boscos i els matollars s'han estès durant les darreres dècades com a resultat de l'augment de temperatura, de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>, i/o de fertilitzants a l'ambient (eutrofització). Aquest fenomen, però, es pot explicar sobretot com a resultat de dos processos d'origen antròpic: la successió secundària a partir de pastures i camps de conreu abandonats, i la superposició d'impactes regressius sobre els ecosistemes terrestres. De fet, actualment aquests ecosistemes terrestres són, en bona part, resultat de l'activitat humana. Els diferents usos que els humans n'hem fet han produït un mosaic d'ecosistemes amb diferents graus de maduresa que formen paisatges heterogenis que garanteixen el manteniment de la diversitat d'aquestes regions mediterrànies. La majoria d'aquests ecosistemes mostren una gran resiliència a les perturbacions i usualment es recuperen per un procés d'autosuccessió.

Tot i així, els freqüents incendis forestals dels darrers anys han cremat desenes de milers d'hectàrees, de manera que el resultat final pel que fa

al creixement o disminució del nostres boscos no és del tot clar. El que sí es pot afirmar és que, segons estimacions provisionals, l'estiu de 1993 (data de les ortoimatges de l'Institut Cartogràfic de Catalunya que serveixen de base per elaborar el Mapa de Cobertes) la superfície dels boscos de Catalunya amb un recobriment de capçades d'almenys un 5% era d'1.217.599 ha, equivalents al 38% del país.

La disponibilitat hídrica és el factor crític per avaluar els efectes del canvi climàtic sobre els ecosistemes terrestres. En efecte, tant l'allargament de la vida de les fulles dels caducifolis descrita en els apartats anteriors com l'acceleració de la renovació de les fulles dels perennifolis observada en estudis recents (Gracia et al., 2001; Sabaté et al., 2002), fenòmens associats a l'increment de la temperatura, comportaran un augment de l'aigua transpirada, que s'afegeix a l'evaporació potencial més elevada, resultant de l'augment de temperatura. En aquells llocs on el bosc disposa de prou aigua per compensar aquesta demanda hídrica més gran, es pot preveure que la producció forestal augmenti. Ara bé, als llocs amb dèficit hídric, que representen la majoria dels ecosistemes terrestres de Catalunya, 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). En casos extrems, àrees actualment ocupades per bosc poden ser substituïdes per matollar i àrees actualment ocupades per matollars poden patir erosió.

A Catalunya es duen a terme estudis experimentals en què es manipula experimentalment la temperatura i la disponibilitat d'aigua de l'ecosistema per estudiar els canvis funcionals i estructurals que podrien tenir lloc si es complissin les previsions d'un augment de la temperatura i d'un eixut creixent al sud d'Europa, tal i com apunten els models climàtics. Entre els ecosistemes terrestres, que són els que més abunden en terres catalanes, els boscos i els matollars mediterranis són els més estudiats pel que fa a la seva resposta davant del canvi climàtic.

### B9.6.1. Els boscos mediterranis

La disponibilitat hídrica constitueix un dels factors més determinants per al creixement i la distribució de les espècies vegetals mediterrànies. Els models climàtics preveuen un augment de la temperatura a les zones de clima mediterrani –entre les quals hi ha Catalunya–, la qual cosa implicaria un augment de l'evapotranspiració que, segons els mateixos models, no aniria acompanyada d'un augment en les precipitacions. Per tant, la disponibilitat hídrica dels boscos mediterranis podria disminuir en les properes dècades, encara més del que ho ha fet en les darreres.

Per estudiar els efectes d'una disminució en la disponibilitat hídrica en ecosistemes forestals mediterranis, s'està realitzant un experiment a l'alzinar de la Solana dels Torners (Serra de Prades). Es tracta d'un bosc d'uns sis metres d'alçada i una densitat mitjana de 16.617 peus ha<sup>-1</sup>, dominat per *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia* i *Arbutus unedo*. L'experiment consisteix en l'exclusió parcial de l'aigua de pluja i de l'escorrentia superficial, amb la qual cosa s'assoleix una disminució d'un 15% de la humitat del sòl. Aquesta disminució alenteix els cicles de l'aigua, del C, del N i del P, i afecta l'ecofisiologia i demografia de les espècies. De fet, ve a corroborar estudis anteriors realitzats als mateixos boscos de Prades, on uns experiments de fertilització i irrigació van permetre comprovar que l'aigua va afectar el creixement diametral i el nitrogen a la dinàmica foliar (Sabaté i Gracia, 1994; Rodà et al., 1999).

El tractament de sequera actual ha reduït el creixement diametral dels troncs en un 37%, però no totes les espècies resulten afectades per igual. Algunes són bastant sensibles, com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren respectivament un creixement diametral 77% i 55% més baix en condicions de sequera, mentre que altres, com *Phillyrea latifolia*, no experimentarien cap disminució apreciable en el creixement diametral (figura B9.10). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quer-*

Sistemes naturals: ecosistemes terrestres Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Santi Sabaté i Carles Gràcia

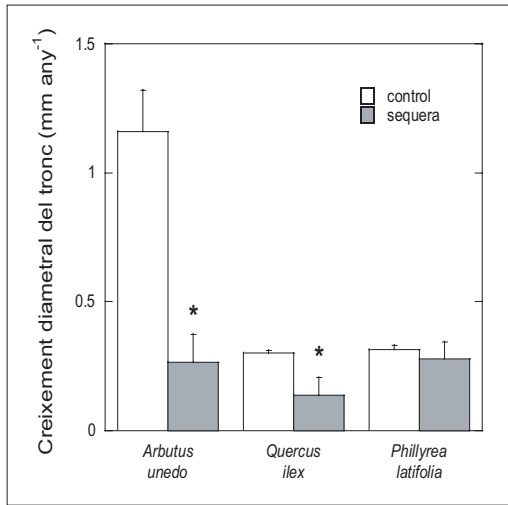


Figura B9.10. Respostes a la sequera (disminució del 15% de la humitat del sòl) de les tres espècies dominants de l'alzinar de Prades. Font: elaboració pròpia a partir d'Ogaya et al., 2003.

*cus ilex* mostren una mortalitat més elevada que *Phillyrea latifolia*. Sota condicions de sequera, l'acumulació de biomassa total aèria del bosc ha minvat un 42% (Ogaya et al., 2002).

Per tant, l'experiment ha posat de manifest que sota condicions més àrides que les actuals, els boscos mediterranis poden reduir bastant les seves taxes de creixement i, per tant, la seva capacitat per segrestar carboni atmosfèric. A més, com que no totes les espècies vegetals resultarien igualment afectades, a llarg termini hi podria haver un canvi en la composició específica del bosc, resultant més afavorides, com és natural, les espècies més resistents a la sequera.

De totes maneres, les prediccions no són mai fàcils, atesa la complexitat de la vida. Els efectes del canvi climàtic es manifesten en la dinàmica de les poblacions vegetals a través de l'establiment de nous individus i de la mortalitat dels establerts. El balanç entre aquests dos processos indica les tendències de les comunitats. En aquest experiment s'ha estudiat l'aparició i supervivència de noves plàntules d'alzina i fals aladern

(*Phillyrea latifolia*), les dues espècies arbòries dominants. Aquestes espècies presenten, en el bosc estudiat, diferents estratègies de reclutament: plàntules de rebrot i llavor, respectivament.

Els resultats indiquen que l'aparició de noves plàntules de fals aladern està més afectada per la secada que el creixement de nous rebrots d'alzina. Aquestes diferències, però, desapareixen amb el desenvolupament de les noves plantes, de manera que la supervivència de plàntules i rebrots és semblant pocs anys després. Aquests resultats indiquen que els efectes de la secada són més importants en les fases inicials del desenvolupament. Tanmateix, les diferències entre espècies poden variar segons la fase de desenvolupament: els adults d'alzina semblen menys resistents a la secada que els de fals aladern, però les pautes de reclutament són les contràries. La cosa es complica encara més si es considera que la supervivència de noves plàntules de moltes d'aquestes espècies, com per exemple l'alzina, depenen de trobar condicions en les que no quedin exposades en excés a la radiació, sobretot en els estadis inicials. Si disminueix molt la cobertura arbòria com a conseqüència del canvi climàtic, també pot ser que disminueixi la disponibilitat d'àrees on les plàntules es puguin instal·lar.

#### B9.6.2. Els matollars mediterranis

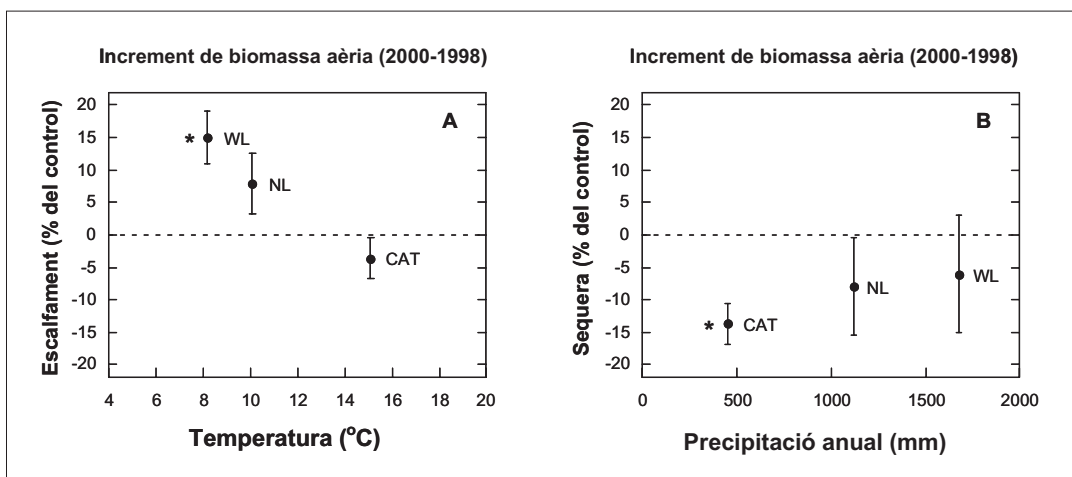
També es duen a terme estudis de les respostes al canvi climàtic de l'altre gran grup d'ecosistemes terrestres: els matollars. Destaca, especialment, el d'escalfament amb tècniques no intrusives dut a terme al Garraf. Fins ara s'havien usat diverses tècniques per manipular la temperatura de l'ecosistema, com radiadors d'infraroig, cables enterrats i hivernacles, però aquests mètodes impliquen perturbacions no desitjades d'alguns paràmetres físics (la llum, el vent o la humitat relativa) o, fins i tot, d'una part de l'ecosistema (sòl). A les brolles del Parc Natural del Garraf actualment s'utilitza una tècnica nova, l'*escalfament nocturn passiu*, per manipular la temperatura de l'ecosistema sense els inconvenients descrits anteriorment.

L'escalfament nocturn passiu s'indueix cobrint, durant la nit, unes parcel·les de l'ecosistema amb tendals fets d'un material refractari a la radiació infraroja. D'aquesta manera queda retinuda una part de l'energia acumulada per l'ecosistema durant el període de llum solar. Amb aquesta metodologia s'augmenta al voltant d'un grau la temperatura de l'ecosistema sense alterar altres variables ambientals. L'eixut s'indueix amb la mateixa tecnologia però cobrint les parcel·les amb tendals de plàstic impermeable mentre duren les pluges (Beier et al., 2003).

Aquests estudis mostren que la magnitud de la resposta a l'escalfament i a la sequera sembla molt diferent depenent de les condicions del lloc d'estudi. Els llocs freds i humits, com són els del nord d'Europa, són més sensibles a l'escalfament, mentre que el nostre país, més càlid i més sec, és més sensible a la sequera (figura B9.11). També depèn de l'estació de l'any: els processos són més sensibles a l'escalfament a l'hivern que no pas a l'estiu i, com passava als boscos, les respostes també depenen de l'espècie i, fins i tot, de l'individu (Peñuelas et al., 2003).

La diferent direcció de la resposta a l'escalfament en funció de l'estació de l'any lliga amb l'efecte que el fred hivernal té sobre la fisiologia de les espècies mediterrànies. Sorprenentment, els resultats mostren que les condicions d'alta irradiància i relativament baixes temperatures poden afectar l'activitat fotoquímica d'aquestes plantes, fins i tot més que no pas l'estrès produït per la sequera estival (Oliveira i Peñuelas, 2001, 2002).

L'experiment del Garraf s'ha realitzat en una de les localitats més eixutes i càlides d'un projecte d'àmbit europeu que estudia els efectes del canvi climàtic sobre les comunitats arbustives, de manera que s'estudien els efectes del canvi climàtic al llarg d'un gradient latitudinal i climàtic. En aquest gradient l'escalfament augmenta la respiració del sòl entre un 0-24%, mentre que l'eixut la disminueix un 12-29%. Per altra banda, la descomposició de la virosta no es veu afectada a llarg termini, tot i que a curt termini l'eixut en retarda la descomposició. Al llarg del gradient climàtic només s'observen quantitats positives de mineralització del nitrogen quan la humitat del sòl és superior al 20%, però està per sota del 60%. És en



aquest rang on s'observa una relació positiva amb la temperatura del sòl (Emmet et al., 2003).

D'aquesta manera es comprova, doncs, que els canvis de temperatura i d'humitat afecten el desenvolupament de la vegetació i el funcionament dels ecosistemes, alterant, per exemple, els cicles del carboni o del nitrogen, o els balanços d'energia (Beier et al., 2003; Emmet et al., 2003; Peñuelas et al., 2003). La figura B9.7 mostra, com exemple de canvi funcional provocat pel canvi climàtic, els resultats d'estudis experimentals a matollars holandesos on s'aprecia com l'escalfament augmenta l'alliberament de nitrats als lixivats del sòl.

Els experiments de sequera i escalfament portats a terme al Garraf indiquen que la sequera fa disminuir el nombre de plàntules i la seva respectiva riquesa d'espècies, tal i com mostra la figura B9.12.

Aquesta disminució també es dona, però en proporcions molt més petites, en el tractament d'escalfament. Aquest efecte es produeix principalment a la germinació i, una vegada la plàntula s'ha establert, la seva supervivència està poc afectada pels tractaments. En general, les espè-

cies que actualment produeixen menys plàntules són les que tindrien més probabilitats de desaparèixer en un escenari climàtic més eixut. Quan les condicions, però, són més extremes, hi ha indicis que la resposta de les espècies pot ésser en alguns casos independent de l'abundància actual de les seves plàntules (Lloret et al., 2004).

Tots aquests estudis suggereixen transformacions importants en la composició de les comunitats vegetals com a conseqüència del canvi climàtic. Aquestes transformacions poden ser ràpides si les fluctuacions interanuals són importants i si existeixen característiques del medi que determinen líndars de resposta en condicions extremes.

Tota aquesta complexitat no fa gens fàcil predir el sentit i la intensitat de les respostes d'aquests ecosistemes al canvi climàtic, però aquests estudis mostren que hi haurà efectes importants. El que sí és cert és, que en qualsevol cas, les prediccions de la condició dels ecosistemes mediterranis en les properes dècades requereixen un millor coneixement de les seves respostes als canvis climàtics i de prediccions regionalitzades del clima i usos del sòl. Això encara és lluny de ser possible a causa de la variabilitat i impredictibilitat que són inherents al mateix sistema climàtic a escala regional i, especialment, a la regió mediterrània.

Convé recordar que és molt probable que els canvis i les respostes no siguin simplement lineals. Tampoc s'ha d'oblidar que la regió mediterrània viu, a més del canvi climàtic i atmosfèric, l'abandonament de terres de cultiu i la fragmentació dels ecosistemes com dos grans canvis en els usos del sòl. Amb tot això es pot preveure que, si tot continua com ara, és fàcil que en les properes dècades hi hagi més ecosistemes en estadis successional primers i menys complexos des d'un punt de vista ecològic.

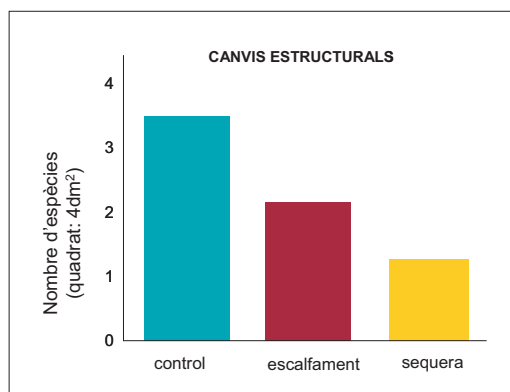


Figura B9.12. Exemple de canvis ecosistèmics estructurals produïts pel canvi climàtic: disminució de la densitat d'espècies reclutades en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1 °C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl de 20%.  
Font: elaboració pròpia a partir de Lloret et al., 2004.

### B9.6.3. Els processos d'erosió i desertització

La disminució de la productivitat vegetal i de la reproducció en resposta a la sequera (o, en menor



grau, a l'escalfament) es tradueix en una disminució de la matèria orgànica que arriba al sòl i, també, del reclutament de noves plantes i del recobriments del sòl, tots ells fenòmens que produeixen una disminució de la capacitat d'aquest de retenir l'aigua. Si el contingut d'aigua del sòl minva, disminueix la productivitat de la vegetació, reduint-se encara més l'entrada de matèria orgànica, en un cercle viciós que es retroalimenta. Les disminucions de l'aigua del sòl incrementen el risc d'incendi i les disminucions de la coberta vegetal i de la matèria orgànica del sòl incrementen, a més, el risc d'erosió. De fet, els riscos d'incendis i d'erosió són els més greus pels matollars mediterranis, especialment a les zones més àrides.

Com més àrida és l'àrea considerada, més lenta és la recuperació de la vegetació després de sequeres múltiples i prolongades i/o d'incendis, fet explicable tant pel temps que tarda en construir nova biomassa com perquè sovint té lloc una degradació del sòl, especialment si hi ha sobreexplotació durant els períodes secs o si hi ha recurrència dels incendis. D'aquesta manera es facilita l'erosió i, en casos extrems, es pot arribar a la desertització. Aquest és un problema que ja és present en zones on els sòls dels ecosistemes degradats són incapaces de retenir l'aigua proporcionada per les tempestes ocasionals i extremes de la tardor, les quals provoquen avingudes i més erosió.

A les zones amb terrasses d'origen agrícola l'erosió és, probablement, una amenaça menys immediata que en zones similars sense terrasses. Les àrees cremades del sud de Catalunya i, sobretot, del País Valencià, són susceptibles de patir erosió perquè en gran part es localitzen en camps generalment sobre substrats margosos molt sensibles a l'erosió, on la precipitació és reduïda (350-600 mm o menys) i està concentrada principalment a la tardor i on, a causa de l'ús agrícola previ, hi ha un nombre d'espècies rebrotadores més petit. Aquests trets agreujarien els efectes directes de la sequera i portarien l'ecosistema a condicions més àrides.

L'atractiu d'aquests ecosistemes per activitats recreatives com ara l'observació de la natura o la cacera podria disminuir i la quantitat de carboni emmagatzemada i absorbida, també. És a dir, que els béns i serveis dels ecosistemes poden ser alterats profundament.

### **B9.7. Els efectes del canvi climàtic sobre els béns i serveis proporcionats pels ecosistemes terrestres i la seva gestió**

Des del punt de vista antròpic, els ecosistemes terrestres són sistemes multifuncionals, que compleixen tres grans tipus de funcions (Rodà et al., 2003): productives, ambientals i socials. En la seva funció productiva, subministren béns naturals renovables, com els aliments, les medicines, els productes derivats de la fusta i els no fusters (pastures, suro, pinyes, caça, bolets, etc.).

Entre les funcions ambientals i ecològiques destaquen els serveis ecosistèmics prestats gratuïtament, com el manteniment de la biodiversitat, la regulació de la composició atmosfèrica i del clima, la regulació dels cicles biogeoquímics, la conservació del sòl i de l'aigua (per exemple, la prevenció de l'erosió) o el magatzematge de carboni.

Entre les funcions socials, les més rellevants són els usos recreatius, educatius i de lleure, les oportunitats per la recerca, els seus valors tradicionals culturals i emocionals, així com el paisatge agradable que constitueixen, funcions que permeten el desenvolupament d'activitats econòmiques importants com el turisme i l'excursionisme.

És evident que les transformacions produïdes pels canvis climàtic i atmosfèric tindran un impacte sobre molts d'aquests béns i serveis i, per tant, sobre els sistemes socioeconòmics (Winnet, 1998). També és clar que les influències del canvi climàtic són difícil de separar de les dels altres components del canvi global, com els canvis atmosfèrics o en els usos del sòl. D'entre aquestes funcions i serveis ecosistèmics interes-

sa especialment tractar la que fa referència al magatzematge de carboni per les implicacions que té en tots aquests serveis, ja que és la base de la producció vegetal que els sustenta, i per les implicacions que té en el balanç de CO<sub>2</sub> atmosfèric, origen últim del canvi climàtic.

#### **B9.7.1. Els balanços de carboni als boscos i matollars catalans**

Quan es parla de balanços de carboni, el que cal estudiar és fins a quin punt els boscos i matollars catalans estan actuant com a fonts o com a captadors i acumuladors de carboni. En aquest balanç intervenen molts processos, complexos i sotmesos a interaccions diverses. A continuació es presenten els trets més importants que poden explicar el balanç de carboni. Tancar aquest balanç al detall no és una tasca fàcil, i més quan en aquesta àlisi intervenen 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. Tot i que en els darrers anys s'ha avançat molt, encara queda molta recerca per fer.

El balanç de carboni depèn de forma important de dos processos essencials que formen part de l'activitat dels organismes: la fotosíntesi i la respiració. S'ha de dir, però, que encara que pels seus resultats ho semblin, fixació o alliberació de carboni del ecosistema no són passos inversos del mateix procés, sinó que són processos independents pel que fa a la seva evolució, localització i bioquímica.

##### **B9.7.1.1. Entrades de carboni: la fotosíntesi**

La fotosíntesi, realitzada en els cloroplasts de les plantes, és la via a través de la qual els productors primaris incorporen CO<sub>2</sub>, i construeixen la matèria orgànica. De forma simplificada es pot dir que els productors primaris retiren CO<sub>2</sub> de l'atmosfera reduint-lo, gràcies als electrons que proporciona l'aigua i l'energia de la llum, produint així la matèria orgànica i alliberant oxigen. El carboni reduït emmagatzema l'energia d'ori-

gen lumínic en forma d'energia química a la matèria orgànica: la biomassa.

Aquesta via depèn de les condicions ambientals. D'entrada, es necessita llum i aigua, però també els nutrients que formen part de la maquinària fotosintètica i d'altres components de la matèria viva (nitrogen, fòsfor, potassi, etc.). Per fer arribar aquests nutrients des de les arrels (que els absorbeixen del sòl) fins als cloroplasts, situats a les fulles, la planta necessita aigua i energia que els faci pujar a través de la tija. A més, aquesta activitat també depèn de la temperatura: a temperatures baixes s'atura i, a temperatures massa elevades, es desorganitza. En aquest sentit, doncs, la temperatura òptima oscil·la entre 15 i 25 graus, en funció dels organismes. En evaporar-se l'aigua que puja des de les arrels fins a les fulles, a través de la transpiració, no només es contribueix a aquest aport de nutrients, sinó que també es permet que la planta es refrigeri. En aquest trajecte de l'aigua, els estomes de les fulles s'obren i deixen sortir l'aigua cap a l'atmosfera i entrar el CO<sub>2</sub>, que és necessari per a la fotosíntesi.

Queda clar que la fotosíntesi va molt lligada a les condicions ambientals i que si aquestes canvien per un canvi climàtic, les plantes en poden resultar molt afectades. En els apartats anteriors ja s'han vist alguns d'aquests efectes. En les condicions mediterrànies, el clima es caracteritza per la manca d'aigua a l'estiu, coincidint amb el període de més energia de radiació disponible i temperatures més elevades. D'altra banda, les baixes temperatures de l'hivern, encara que no de forma excessiva, redueixen l'activitat fotosintètica. La primavera i la tardor són els períodes de més activitat en coincidir la disponibilitat d'aigua i temperatures òptimes per l'activitat de les plantes, sobretot a la primavera.

Si aquesta manca d'aigua s'accentua, la realització de l'activitat fotosintètica serà més complicada. Tancar els estomes com a conseqüència de la manca d'aigua significa barrar l'entrada del CO<sub>2</sub>

i aturar la fotosíntesi, així com aturar la refrigeració de les fulles que a l'estiu reben, en el cas mediterrani, un excés de radiació. Si el  $\text{CO}_2$  es fa més abundant a l'atmosfera, com està passant a causa de l'activitat humana, pot incrementar-se la facilitat de captació d'aquest gas, necessari per fer la fotosíntesi, a través dels estomes. La demanda d'evaporació de l'atmosfera, com s'ha dit en apartats anteriors, tendeix a incrementar-se eixugant els nostres ecosistemes de forma més intensa, i per tant estimulant la transpiració. Si això s'accentua i, a més, no s'incrementa la disponibilitat d'aigua –més aviat es preveu una reducció de pluja a les zones mediterrànies– les plantes mediterrànies veuran accentuat el seu estrès hídric i disminuïdes les seves opcions per fer fotosíntesi. A més, les plantes deixaran menys aigua al sòl, quedant més seques en els períodes d'eixut i més susceptibles a la combustió, afavorint la propagació d'incendis (com també s'ha esmentat anteriorment). La disponibilitat més elevada de  $\text{CO}_2$  pot apaivagar l'efecte de la manca d'aigua, fent més eficient el seu ús, però el manteniment d'aquesta eficiència a llarg termini no està clar i pot no ser suficient per compensar-lo.

#### **B9.7.1.2. Sortides de carboni: la respiració**

La respiració és la via a través de la qual els organismes utilitzen l'energia química emmagatzemada a la matèria orgànica. Aquest procés és molt general i no només el realitzen les plantes que fan la fotosíntesi, sinó que també el realitzen els animals i els microorganismes (bacteris i fongs). Així, de manera simplificada, es pot dir que mentre s'oxida la matèria orgànica es consumeix oxigen, es produeix  $\text{CO}_2$  i aigua, i s'aprofita l'energia química del carboni reduït durant la fotosíntesi. D'aquesta manera, el  $\text{CO}_2$  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 dipositada. Per això, aquests es denominen organismes autòtrofs i la seva respiració rep el nom de respiració autotròfica.

La diferència entre el carboni fixat a la fotosíntesi (*producció primària bruta*) i la *respiració autotròfica* dona el *primer nivell del balanç de carboni*, que rep el nom de *producció primària neta*. Aquest balanç explica el creixement i el manteniment de la biomassa. Per tal que un sistema, bosc o matollar, mantingui la seva estructura o la incrementi, la producció primària neta no pot ser negativa.

A més, com que la resta d'organismes de l'ecosistema depenen d'aquest balanç positiu de carboni, se n'ha de produir prou com per compensar també el creixement i la respiració dels altres organismes de l'ecosistema que no són autòtrofs: els heteròtrofs. Aquests organismes depenen de la matèria orgànica fixada pels productors primaris. A la seva respiració, que funciona igual que la de les plantes, se la denomina *heterotròfica*. Aquest és el *segon nivell del balanç de carboni*. La producció neta de l'ecosistema, és a dir, la diferència entre la producció primària neta i la respiració heterotròfica.

Encara hi ha un tercer nivell del balanç de carboni, que correspon al nivell del bioma –el que s'anomena la producció neta del bioma. Aquest nivell incorpora l'espai i la seva heterogeneïtat a una escala més gran. És a dir, els matolls i boscos estan sotmesos a pertorbacions, com per exemple el foc, que acaben oxidant parcialment la matèria orgànica de l'ecosistema i retornant  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera en reduir-ne l'estructura. El balanç a nivell de bioma incorpora, doncs, el retorn de  $\text{CO}_2$  atribuïble a les pertorbacions, integrant pel que fa al balanç de carboni escales de paisatge més grans, amb ecosistemes en diferents estadis de recuperació després de les pertorbacions a què han estat sotmeses en algun moment de la seva història o desenvolupament.

Tornant a la producció primària neta, aquesta constitueix l'acumulació d'estructura de l'ecosistema, però si els compostos de carboni són mòbils (com, per exemple, el midó) constitueixen les reserves d'energia que la planta pot utilitzar

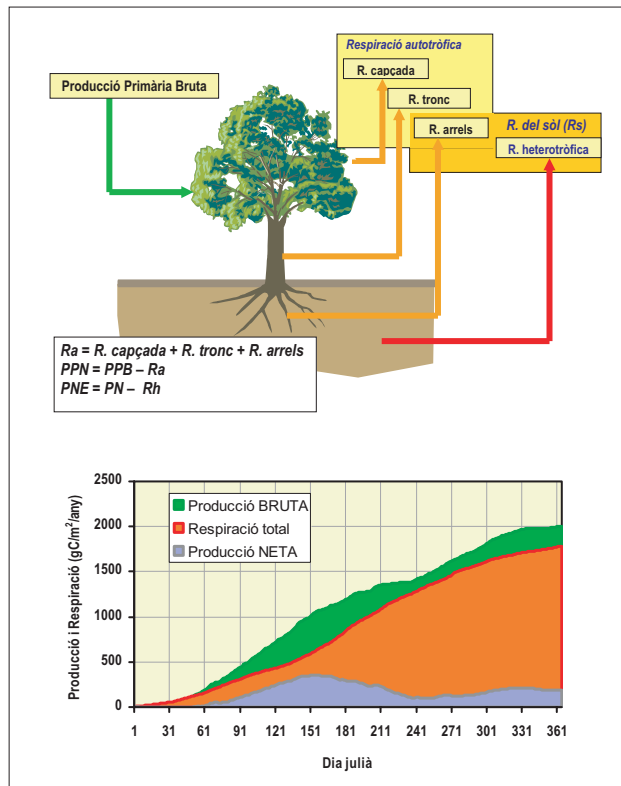


Figura B9.13. A dalt: representació esquemàtica i simplificada dels principals components pel càlcul del balanç de carboni als boscos i matollars. A sota: producció i respiració, les quals a escala anual són del mateix ordre de magnitud. El balanç de carboni és el resultat de restar aquests dos grans fluxos de signe contrari. Les dades corresponen a un bosc mediterrani típic.

Font: elaboració pròpia.

en períodes en què la fotosíntesi no és possible, ja sigui perquè és de nit o bé perquè es tracta de períodes amb estrès hídric, com s'ha esmentat anteriorment. La respiració depèn del substrat (la matèria orgànica que s'oxida) i de l'oxigen, que és prou abundant a l'atmosfera. En aquest cas, no es necessita ni la llum, ni el  $\text{CO}_2$  (poc abundant comparat amb l'oxigen), ni l'aigua que no sigui la present a la matriu cel·lular.

Com a resultat d'això, la respiració, com la fotosíntesi, està condicionada per la temperatura, que afecta molt l'activitat metabòlica, però no pels altres factors que modulen la fotosíntesi. Tampoc no s'atura mentre l'organisme disposi

de substrat per respirar. Per tant, la respiració augmenta amb l'increment de temperatura, però aquesta ho fa encara més que la fotosíntesi, donat un cert increment de temperatura. Aquesta diferència determina que si augmenta la temperatura com a conseqüència del canvi climàtic, malgrat que ambdós processos puguin augmentar, la respiració ho fa més ràpidament.

L'augment de la temperatura és una de les variables de canvi més acceptades en el marc del canvi climàtic, per la qual cosa la producció primària neta es pot veure reduïda en no incrementar-se de forma equivalent la fotosíntesi. És més, en condicions de manca d'aigua, en les quals la fotosíntesi està aturada i la respiració continua activa, la producció primària neta pot quedar sensiblement reduïda. Ara bé, si la temperatura augmenta massa també s'arriba a una situació on la maquinària metabòlica es desorganitza, com ja s'ha esmentat en el cas de la fotosíntesi.

Si la respiració autotròfica va consumint les reserves de carboni, el bosc o matollar pot anar perdent estructura (fulles, per exemple) 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 carboni són tant importants per explicar les superacions de períodes d'estrès ambiental. Un exemple és l'episodi de sequera viscut l'any 1994, després del qual les alzines de les muntanyes de Prades van reconstruir les seves capçades, havent perdut pràcticament totes les fulles, gràcies a les seves reserves de midó (Gracia et al., 1996, 1999a).

### B9.7.1.3. La renovació foliar

Altres aspectes relacionats amb la dinàmica del carboni a les plantes, lligats a la producció pri-

mària neta, tenen a veure amb la forma com aquestes plantes mantenen les seves estructures. Per exemple, la renovació foliar, que es pot representar per la vida mitjana de les fulles, està molt lligada a la temperatura.

S'ha observat, en el cas d'arbres de fulla perenne com l'alzina, que un increment de temperatura pot accelerar la seva dinàmica foliar i fer disminuir la durada de les fulles a les capçades. Aquest fenomen encara s'accentua més en condicions de sequera. Al Montseny, amb una temperatura mitjana de 10 °C i 700 mm anuals de pluja, la vida mitjana de les fulles d'aquesta espècie és de 2,8 anys, mentre que a Sevilla, amb una temperatura mitjana de 18,8 °C i 535 mm anuals de pluja, la vida mitjana de les fulles es redueix a 1,7 anys (Gracia et al., 2001). Això que s'observa a les fulles, també pot ser vàlid per les arrels fines, que a l'alzinar de Prades duren una mitjana de poc més de 100 dies i desapareixen en condicions de sequera (López et al., 1998, 2001a, 2001b).

Per tant, ambdues estructures necessiten utilitzar més carboni mòbil de reserva per fer front a la seva renovació. Si el canvi climàtic apunta cap a un increment de les temperatures, es dedueix que la renovació foliar i de les arrels fines pot experimentar una acceleració. Per altra banda, en apartats anteriors ja s'ha comentat que la durada de les fulles dels arbres de fulla caduca (faig, roure, etc.) a l'hivern s'està allargant. Això vol dir que les treuen abans i se'n desprenen més tard, fent que el període d'activitat vegetativa i, per tant, de producció, sigui més llarg. Ara bé, si aquestes espècies s'han d'enfrontar amb períodes d'eixut més accentuat del que estan adaptades per efecte del canvi climàtic, ho poden passar molt malament. No s'ha d'oblidar que les fulles d'un caducifoli són més tendres i més sensibles a les pèrdues d'aigua que les d'un perennifoli de fulla dura com l'alzina i que, per tant, podran aguantar pitjor les pèrdues d'aigua davant d'un increment d'estrès hídric.

#### **B9.7.1.4. La respiració heterotròfica i el balanç de carboni de l'ecosistema**

La respiració heterotròfica, com l'autotròfica, també depèn de la temperatura, tot i que es basa en la utilització, per part dels organismes heteròtrofs, de la matèria orgànica construïda prèviament per altres organismes, els productors primaris. Aquesta matèria orgànica pot ser processada quan encara forma part d'altres organismes vius, quan encara és biomassa, com fan els insectes defoliadors que s'alimenten directament de la biomassa foliar de les plantes, o els vertebrats herbívors.

No obstant això, també pot ser processada quan aquesta matèria orgànica ja no és viva, constituint el que s'anomena la necromassa. En aquest cas els organismes es denominen descomponedors (animals que viuen al sòl, fongs i bacteris). Aquesta necromassa s'acumula per la força de la gravetat al sòl, i, per tant, l'activitat de descomposició és molt important en aquest compartiment dels boscos i matollars.

Per tant, la respiració del sòl té dues components importants: la respiració autotròfica que realitzen les plantes a les arrels i la respiració heterotròfica que resulta, sobretot, de l'activitat de descomposició de la matèria orgànica del sòl. La respiració heterotròfica del sòl depèn de la temperatura, com ja s'ha esmentat anteriorment, però també del contingut d'aigua al sòl. Per accedir al substrat (les estructures de la necromassa), els principals organismes descomponedors (bacteris i fongs) necessiten un medi mínimament humit. Per tant, en períodes en què el sòl estigui molt sec, com l'estiu, tot i que les temperatures siguin prou altes aquesta activitat de respiració es veurà reduïda. Així doncs, si les condicions de canvi climàtic porten a sòls més secs, l'activitat de descomposició també es veurà frenada i, al mateix temps, també ho serà la reposició del nutrients lliures i en sol·lució a l'aigua del sòl que poden tornar a ser utilitzats per les plantes.

Fins ara s'han descrit alguns processos i components importants del balanç de carboni i com

poden ser afectats per les condicions ambientals. Però per poder quantificar-los i avaluar la seva importància cal mesurar-los i entendre com funcionen amb relació a les variables ambientals (la radiació, la temperatura, la disponibilitat hídrica als ecosistemes, etc.). Això s'ha fet i es continua fent en diferents experiments mitjançant tècniques diverses, algunes de les quals s'han exposat en apartats anteriors. Aquestes tècniques consisteixen en la mesura de l'intercanvi d'aigua i CO<sub>2</sub> a diferents compartiment de l'ecosistema.

Aquest és el cas de mesures experimentals que es realitzen a l'alzinar del Montseny amb cambres dissenyades per mesurar el flux del sòl, de troncs i les capçades (Sabaté et al., *en preparació*). Aquest tipus de mesures també s'estan comparant amb altres tècniques, com la *eddy covariància*, que estima de forma integrada la producció neta de l'ecosistema. Això s'està realitzant a l'alzinar de Puechabon (prop de Montpeller, a França), on es disposa dels equipaments i les condicions idònies per aplicar aquesta metodologia.

La figura B9.14 presenta els valors obtinguts en un alzinar mediterrani. En general, es pot dir que el balanç de carboni a nivell d'ecosistema (producció neta de l'ecosistema) és un valor relativament petit (140 g C m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup>), que depèn de la diferència entre dos números molt més grans, la producció primària bruta per una banda (1.602 g C m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup>), i respiració total del ecosistema (1.462 g C m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup>).

Per altra banda, per entendre els fluxos de carboni és important quantificar les quantitats de carboni que hi ha als boscos. Pel que fa a la part aèria, es disposa de bones bases de dades, com les proporcionades pels inventaris forestals (com l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya), així com els nous inventaris estatals. La part menys coneguda és la biomassa subterrània, que en el cas dels boscos mediterranis és molt important i en el cas de l'alzinar pot representar més del 50% de la biomassa total (5.932 g C m<sup>-2</sup> en front dels 5.393 g C m<sup>-2</sup> de carboni a la bio-

massa aèria). A aquest carboni s'ha d'afegir la necromassa acumulada al sòl, que molt sovint és superior al carboni total de la biomassa, encara que la informació no és tant abundant com la disponible per la biomassa aèria. En el cas de l'alzinar de la figura B9.14 és de 10.237 g C m<sup>-2</sup>. Actualment hi ha en marxa projectes europeus que tenen per objectiu la creació de bases de dades conjuntes, combinant les dades dels inventaris forestals clàssics amb les de les bases de dades dels inventaris de sòls. Aquestes bases de dades serveixen per quantificar el carboni en el moment actual i permeten fer projeccions de futur, tal i com es veurà a continuació.

#### **B9.7.1.5. Els models en l'exploració d'escenaris futurs**

La comprensió d'aquests processos permet la seva modelització en funció de les condicions ambientals. Això és el que s'està fent en el marc de diferents projectes europeus (LTEEF, LTEEF-II, SilviStrat, ATEAM) amb el model GOTILWA+, que s'està aplicant en diferents tipus d'ecosistemes (Gràcia et al., 1999b; Sabaté et al., 2002). Aquest model, desenvolupat en el marc de condicions mediterrànies tot i que s'està aplicant arreu d'Europa, descriu el balanç de carboni i aigua, entre d'altres, seguint els processos indicats anteriorment i partint de la situació present tal i com reflecteixen els inventaris forestals i de sòls. Per acceptar els resultats d'un model com GOTILWA+ cal verificar i comprovar que el model reproduïx els valors de determinades variables de forma equivalent als valors independentment obtinguts al camp (vegeu Kramer et al., 2002).

Aquest procés és molt laboriós i representa un *feedback* constant de millora, a mesura que s'incorporen descripcions millors dels processos o es disposa de noves dades que en permeten la verificació. Per altra banda, no cal oblidar que si bé els resultats de les projeccions d'un model cap al futur depenen del propi model (i dels processos que descriu i de com els incorpora), també depenen dels escenaris de canvi climàtic amb què el

model es confronti. És a dir, quan es parla de canvi climàtic, això pot significar moltes coses diferents dins un ventall d'escenaris generats amb diferents criteris i assumpcions de partida.

En general, es pot afirmar que la majoria dels escenaris de canvi climàtic preveuen un increment de temperatura, a més del de CO<sub>2</sub>, i, a la zona mediterrània, una disminució de la precipitació d'entre un cinc i un deu per cent. Per analitzar els impactes de cada escenari climàtic sobre els ecosistemes, s'ha de descriure acuradament quines són les condicions ambientals de la projecció climàtica futura. Això permet interpretar diferents respostes de l'ecosistema en funció de la combinació de condicions ambientals explorades a les que poden quedar exposades els ecosistemes mediterranis en un futur.

L'esquema de la figura B9.15 resumeix el procediment seguit per simular la situació a Catalunya. La informació estructural del bosc s'ha obtingut de les parcel·les de l'*Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya* (Gracia et al., 2000).

De les 10.644 parcel·les mostrejades entre els anys 1988 i 1994, s'han considerat 147 parcel·les representatives de les espècies més àmpliament distribuïdes. En cada comarca s'ha seleccionat les parcel·les de cada espècie que més s'aproximen a la densitat mitjana d'arbres i a l'àrea basal de l'espècie a la comarca. Les característiques del sòl, especialment en allò que fa referència a la textura, al contingut de matèria orgànica i altres propietats relacionades amb la reserva hídrica, s'han obtingut de les parcel·les de Catalunya de la *Red de seguimiento de los daños (Nivel I) en los bosques*

*de España durante 1987-1996* (Montoya i López Arias, 1997).

Per dur a terme aquestes simulacions es requereixen els valors de variables climàtiques (radiació solar incident, precipitació, temperatura màxima i mínima, dèficit de vapor d'aigua a l'aire, velocitat del vent i concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>). Aquesta informació s'ha elaborat a partir de les dades del Servei Meteorològic de Catalu-

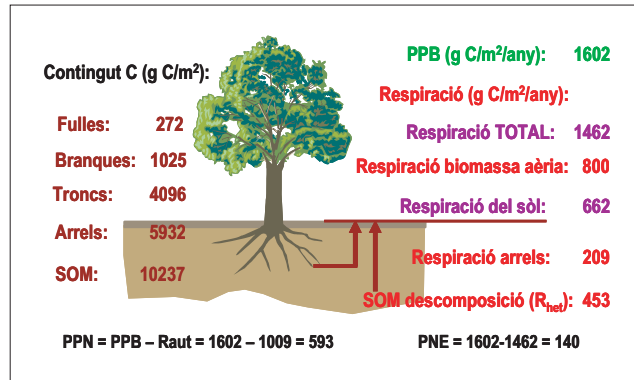


Figura B9.14. Contingut i fluxos de carboni en un alzinar tipus (dades procedents de Prades, el Montseny i Puechabon).

Font: elaboració pròpia.

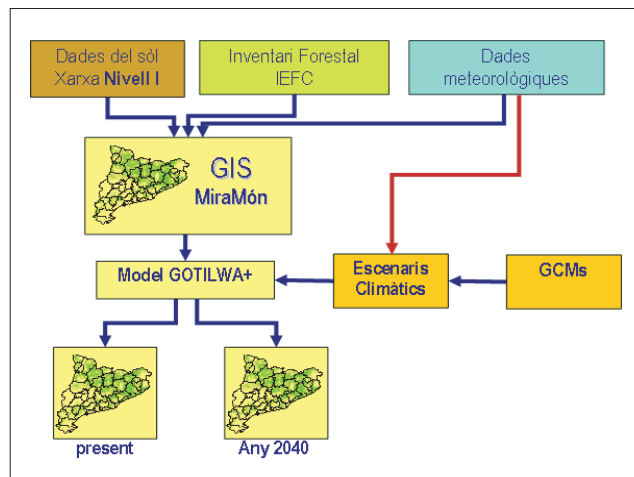


Figura B9.15. Representació esquemàtica del mètode d'anàlisi basat en l'aplicació del model GOTILWA+ per simular la situació actual i l'esperable el 2040 als ecosistemes forestals de Catalunya.

Font: elaboració pròpia.

nya. A més de la situació actual, es va generar un escenari de canvi climàtic assumint un increment gradual de la temperatura de  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{any}$ , un increment anual d'un 1% de  $\text{CO}_2$  i d'una disminució de la pluja anual d'un  $-0,03\%$  per any, que equival a un escenari de tipus mitjà dels previstos del IPCC.

Fent servir el sistema d'informació geogràfica MiraMón (Pons, 2001) s'han interpolat els resultats per la representació cartogràfica de la figura B9.16. La producció neta de l'ecosistema, mostrada a la figura B9.16 (a) és, en mitjana, de  $60\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$ . Resulta d'una producció primària bruta (fixació de carboni) de  $1.522\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$  i una respiració total (incloent-hi l'heterotròfica) de  $1.462\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$ , tal i com es pot observar a les figures B9.16 (b) i B9.16 (c).

Durant els propers quaranta anys la producció neta de l'ecosistema variarà poc ( $63\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$ ), malgrat que els seus components s'incrementaran considerablement. La producció bruta de l'any 2040 s'incrementarà un 56% respecte l'actual (fins a  $2.370\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$ ) i la respiració total ho farà en un 58% (fins a  $2.307\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$ ), tal i com recull la figura B9.16. A aquest increment de la respiració contribueix l'increment de la producció de fullaraca, que passa de  $205\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$  a  $377\text{ g C m}^{-2}\text{ any}^{-1}$  l'any 2040, com mostra la figura B9.16(d). És a dir, augmenta un 84%, en part com a conseqüència de la reducció de la vida mitjana de les fulles dels perennifolis, que passa del valor mitjà actual de 2,6 anys a un valor de 1,9 anys l'any 2040, fet que s'il·lustra a la figura B9.16(e).

Aquests canvis fenològics comporten canvis fisiològics importants i, sobretot, un increment de la transpiració anual. Com a conseqüència d'aquest fet, la reserva hídrica als sòls forestals, que actualment és de  $32\text{ mm (l/m}^2\text{)}$  quan es considera el valor mitjà anual a cada punt passa a ser només de  $24\text{ mm}$  –vegeu la figura B9.16(f)– que representa una disminució del 25% de la reserva hídrica. Aquest fet és particularment crític en un

ambient amb dèficit hídric estival com és la regió mediterrània. Segons aquests resultats, és fàcil comprendre que el paper de molts boscos mediterranis com a embornals de carboni pot veure's seriosament compromès durant les properes dècades.

#### **B9.7.2. Algunes actuacions per als propers anys: més recerca i millores en la gestió dels ecosistemes**

A partir de tots els estudis apuntats anteriorment, es constata com els canvis atmosfèrics i climàtics afecten de manera important el funcionament i l'estructura dels ecosistemes terrestres mediterranis, tant pels seus efectes propis com per les seves interaccions. Per tal de conèixer millor en quin grau ho fan i millorar-ne la gestió, fan falta nous estudis experimentals en condicions molt properes a les naturals, que aprofitin els avenços tecnològics, per exemple, aplicant-los als estudis del passat remot i proper i a la teledetecció. No cal dir, a més, que és necessari buscar les sinèrgies pròpies de la multidisciplinarietat. Aquests exemples de treballs que s'han presentat resumits en aquest capítol pretenen anar en aquesta línia.

En qualsevol cas, els ecosistemes mediterranis presenten una extraordinària varietat orgànica en l'espai i el temps, a més d'una gran resiliència. Aquesta heterogeneïtat multidimensional i aquesta resiliència són el resultat de la coevolució amb els humans i les seves activitats i els seus paisatges culturals. Evolucionen constantment com a conseqüència de les modificacions induïdes pels focs, els humans, el seu bestiar i les seves eines. I ara, a més, pel canvi climàtic. Així doncs, la dinàmica dels ecosistemes terrestres mediterranis, gairebé tots seminaturals, es pot entendre com una sèrie de degradacions antropogèniques i de regeneracions subseqüents.

De fet, tant la sobreexplotació com la protecció completa poden dur a estadis inferiors de l'atractiu escènic i de la utilitat econòmica d'aquests ecosistemes terrestres. La introducció



El canvi climàtic a Catalunya Sistemes naturals: ecosistemes terrestres

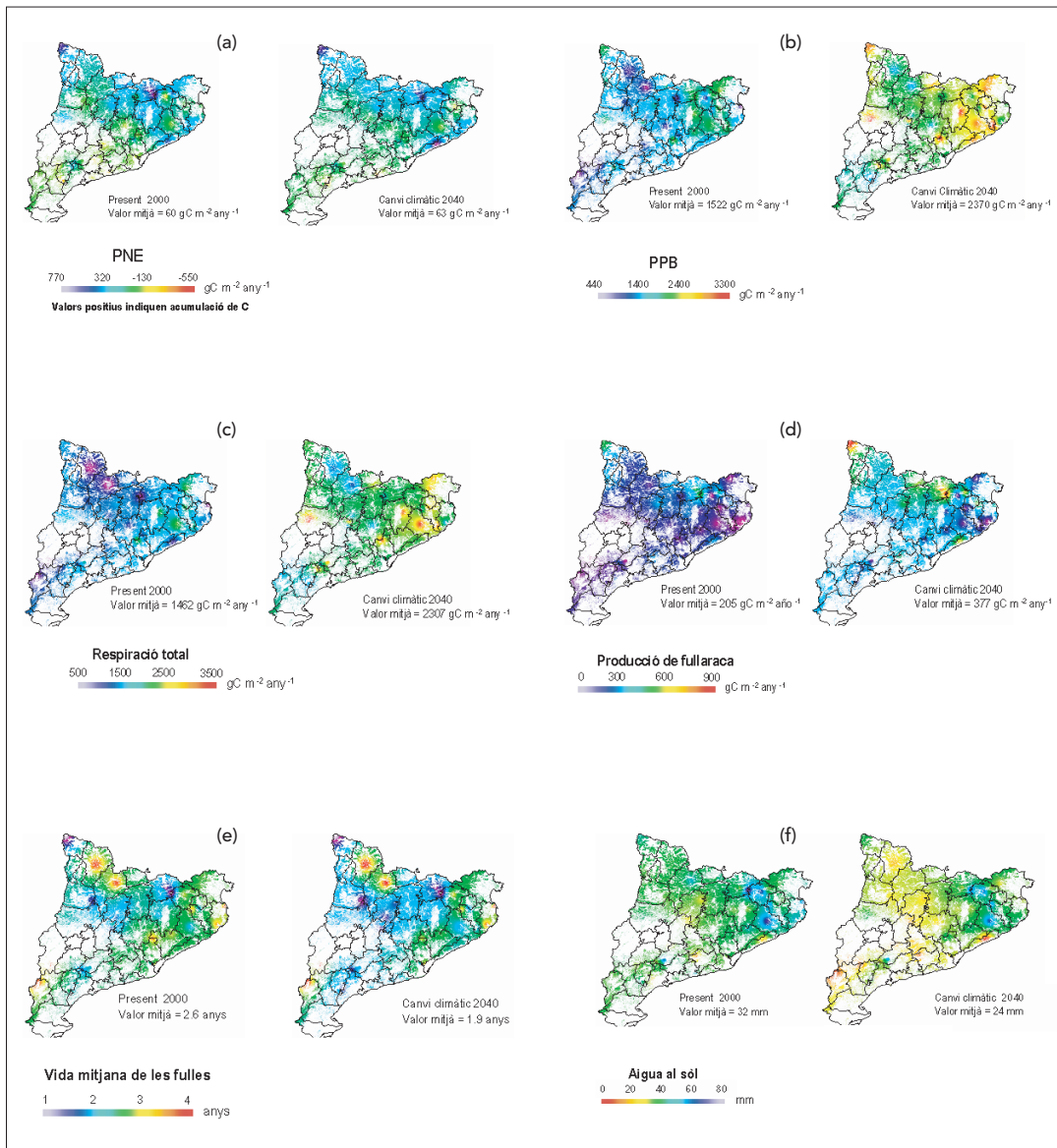


Figura B9.16. Representació cartogràfica dels resultats de l'anàlisi simulador esquematitzat a la figura B9.15 per simular la situació actual dels ecosistemes forestals de Catalunya i la prevista per al 2044: (a) producció neta de l'ecosistema; (b) producció primària bruta (fixació del carboni); (c) respiració total de l'ecosistema; (d) producció de fullaraca; (e) vida mitjana de les fulles; (f) reserva hídrica als sòls forestals.  
 Font: elaboració pròpia.

d'estratègies multiús per a la gestió i rehabilitació dels ecosistemes terrestres mediterranis requereix un gran esforç per part de l'Administració, però també en termes d'educació i de recerca, per poder donar esperança al desenvolupament futur d'alguns d'aquests ecosistemes terrestres, sovint negligits i desolats com els matollars mediterranis, i dels seus recursos en el marc dels canvis actuals de clima i usos del sòl.

Heus ací alguns pensaments sobre cap on sembla que hauria d'anar la gestió dels ecosistemes terrestres en relació al canvi climàtic:

- En els propers anys, les polítiques d'aforestació d'espais agrícoles abandonats i de reforestació de zones pertorbades haurien de tenir en compte les condicions que s'estan projectant per al futur immediat. Entre aquestes destaca la d'una reducció de la disponibilitat hídrica com a conseqüència tant de la disminució de les precipitacions i/o l'augment de l'evapotranspiració potencial com d'una demanda més elevada per part d'uns ecosistemes més actius.
- La gestió dels espais forestals, i dels naturals en general, ha d'incorporar una escala de paisatge, on s'inclogui una planificació a gran escala que consideri la combinació d'espais de tipus divers, així com el seu múltiple ús i l'efecte de les pertorbacions (com per exemple els incendis forestals).
- La política de recerca i inventari de recursos hauria de fer un esforç en la quantificació del carboni a la biomassa subterrània i als sòls, a més del de la biomassa aèria, ja que aquestes dades són escasses, tot i que es necessiten amb urgència.
- Per pal·liar el canvi climàtic mitjançant un increment en la captació de  $\text{CO}_2$  i una reducció en les pèrdues d'aquest mateix gas s'hauria d'actuar sobre l'aforestació i la reforestació, tal i com s'ha apuntat abans, i, a més, s'hauria d'allargar la immobilització del carboni en els productes forestals i protegir els sòls.
- La gestió forestal hauria d'incorporar el canvi

de condicions ambientals, per exemple, a l'hora de definir les intensitats d'intervenció i la seva freqüència. Per exemple, reduir les densitats de rebrots en boscos d'alta densitat s'ha vist com una manera efectiva de disminuir l'impacte de sequeres extremes.

- Per fer arribar al gran públic la problemàtica del canvi climàtic i els seus efectes i les interaccions amb els ecosistemes terrestres, es disposa del canvi fenològic com a eina fàcil i popular que mostra a tothom com el canvi climàtic afecta la vida. També s'haurien d'aprofitar esdeveniments com la sequera de l'any 1994 per fer prendre consciència sobre els efectes d'una reducció d'aigua en els ecosistemes mediterranis. En aquests i en tots els altres termes esmentats s'haurien de difondre les activitats de recerca a través dels mitjans de comunicació. També s'hauria de donar suport a les activitats de comunicació (conferències, xerrades, etc.) on participin els actors implicats en la recerca i la gestió forestal i d'espais naturals.

#### B9.8. Instal·lats en el canvi

Catalunya, com la resta del planeta, viu instal·lada en el canvi. Un canvi que, en moltes ocasions durant la història de la Terra, ha estat espectacular, més que no pas el que ara es coneix amb el nom de *canvi global*. De totes maneres, molts d'aquests grans canvis s'han produït a escala geològica, moltes vegades en períodes de milions d'anys, mentre que l'actual és un canvi accelerat, que s'està produint en poques dècades (Peñuelas, 1993; IPCC, 2001). I, a més, és important recordar que tots els canvis descrits en aquestes darreres dècades s'han produït amb un escalfament que és només un terç o menys del previst per al segle que ve.

Els models climàtics no són perfectes, però la quasi unanimitat de tots ells, i el camí que estan seguint les temperatures fins ara, fan témer que les seves previsions puguin ser encertades. És cert que caldrà veure què passa en els propers anys –fins i tot podria passar que els models fallessin d'alguna manera (la màquina climàtica i

la vida són immensament complexes, sovint no lineals). No obstant això, de moment el que es veu és que la biosfera batega cada vegada amb més intensitat perquè una de les seves espècies, la humana, li proporciona recursos (CO<sub>2</sub> i fertilitzants) i energia (escalfament) de forma accelerada fins que actuï algun factor limitant: aigua, llum, contaminació, etc., o fins i tot canvis en el comportament dels humans (lliures o bé forçats pels mateixos esdeveniments). Seria, com a mínim, poc intel·ligent esperar sense actuar a veure si la calor, la sequera i les pluges torrencials desertitzen les terres catalanes o la mar engoleix el Delta.

### Referències bibliogràfiques

- BEIER, C.; EMMET, B.; GUNDERSEN, P.; TIETEMA, A.; PEÑUELAS, J.; ESTIARTE, M.; GORDON, C.; GORISEN, A.; LLORENS, L.; RODÀ, F.; WILLIAMS, D. (2004). "Novel Approaches to Study Climate Change Effects on Terrestrial Ecosystems in the Field: Drought and Passive Nighttime Warming". *Ecosystems*, vol.7, p. 538-597.
- CASTELLS, E.; ROUMET, C.; ROY J.; PEÑUELAS, J. (2002). Intraspecific variability of phenolic concentrations and their responses to elevated CO<sub>2</sub> in two Mediterranean perennial grasses. *Environmental Experimental Botany*, núm. 47, p. 205-216.
- DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X.; TERRADAS, J. (2002). "Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires". *Ecology*, núm. 83, p. 2.293-2.303.
- EMMET, B.; BEIER, C.; ESTIARTE, M.; TIETEMA, A.; KRISTENSE, H. L.; WILLIAMS, D.; PEÑUELAS, J.; SCHMIDT, I.; SOWERBY, I. (2004). "The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies across an environmental gradient". *Ecosystems*, vol.7, p. 625-637.
- GRACIA, C. A.; BELLOT, J.; SABATÉ, S.; ALBEZA, E.; DJEMA, A.; LEÓN, B.; LÓPEZ, B.; MARTÍNEZ, J. M.; RUÍZ, I.; TELLO E. (1996). "Anàlisi de la Resposta de *Quercus ilex* L. a tractaments de aclaro selectivo". A: *Restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. Fundación CEAM. p. 547-601.
- GRACIA, C. A.; SABATÉ, S.; MARTÍNEZ, J. M.; ALBEZA, E. (1999)a. "Functional responses to thinning". A: Rodà F., Retana J., Gracia C., Bellot J. *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies Vol. 137* Heidelberg: Springer-Verlag, p. 329-338.
- GRACIA, C. A.; TELLO, E.; SABATÉ, S.; BELLOT J. (1999)b. "GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth". A: RODÀ F., RETANA J., GRACIA C., BELLOT J. *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies Vol. 137* Heidelberg: Springer-Verlag, p. 163-179.
- GRACIA, C.; BURRIEL, J. A.; MATA, T.; VAYREDA, J. (2000). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. 9 volums. Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals.
- GRACIA, C. A.; SABATÉ, S.; LÓPEZ, B.; SÁNCHEZ A. (2001). "Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión y cambio global". A: *Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional*. Granada: AEET, CSIC Press.
- GRACIA, C. A.; SABATÉ, S.; 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>>
- HUGHES, L. (2000). "Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?" *Trends in Ecology and Evolution*, núm 15, p. 56-61.
- IPCC (1996). A: HOUGHTON J.J., MEIRO FILHO L.G., CALLEDAER B.A., HARRIS N., KATTENBERG A., MASKELL K. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2001.). A: HOUGHTON J. T., YIHUI D., et al. *The Scientific Basis. Third Assessment Report of Working Group I*, Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- KEELING, C.D.; CHIN, J.F.S.; WHORF, T.P. (1996). "Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements". *Nature*, 382, p. 146-149.
- KÖRNER, C. (2000). "Biosphere responses to CO<sub>2</sub> enrichment". *Ecological Applications*, núm. 10, p. 1.590-1.619.
- KRAMER, K.; LEINONEN, I.; BARTELINK H. H.; BERBIGIER, P.; BORGHETTI, M.; BERNHOFER C. H.; 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.; VESALA, T. (2002). "Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes at 6 forest sites in Europe". *Global Change Biology*, vol. 8, p. 213-230.

- LLORET, F.; D. SISCART (1995). "Los efectos demográficos de la sequía en poblaciones de encina". *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, p. 77-81.
- LLORET, F.; PEÑUELAS J.; ESTIARTE M. (2004). "Experimental evidence of seedling diversity reduction by climate change in a Mediterranean-type community". *Global Change Biology*, vol.10, p. 248-258.
- LLUSIA, J.; J. PEÑUELAS; B. S. GIMENO (2002). "Seasonal and species-specific Mediterranean plant VOC emissions in response to elevated ozone concentrations". *Atmos. Environ.*, núm 36, p. 3931-3938.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; RUÍZ, I.; GRACIA, C. (1997). "Effects of elevated CO<sub>2</sub> and decreased water availability on holm oak seedlings in controlled environment chambers". A: Mohren G.M.J., Kramer K., Sabaté S. *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.125-133.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. (1998). "Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: effects of drought and stem density". *Tree Physiol.* núm.18, p. 601-606.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. (2001a). "Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest". *Plant and Soil*, núm. 230, p. 125-134.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. (2001b). "Fine root longevity of *Quercus ilex*". *New Phytol.*, núm. 151(3), p. 437-441.
- MYNENI, R.B.; KEELING, C.D.; TUCKER, C.J.; ASRAR, G.; NEMANI, R.R. (1997). "Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991". *Nature*, núm. 386, p. 698-702.
- MONTOYA, R.; LÓPEZ ARIAS, M. (1997). *La Red Europea de Puntos de Seguimiento de daños en los bosques (Nivel I) en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Publicaciones del O.A. Parques Nacionales.
- OGAYA, R.; PEÑUELAS, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 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*, vol. 180, p. 175-184.
- OLIVEIRA, G.; PEÑUELAS, J. (2001). "Allocation of absorbed light energy into photochemistry and dissipation in a semi-deciduous and an evergreen Mediterranean woody species during winter". *Functional Plant Biology*, núm. 28, p. 471-480.
- OLIVEIRA, G.; PEÑUELAS, J. (2002). "Comparative protective strategies of *Cistus albidus* and *Quercus ilex* facing photoinhibitory winter conditions". *Environmental and Experimental Botany*, núm. 47, p. 281-289.
- PARMESAN, C.; YOHE, G. (2003). "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems". *Nature*, núm. 421, p. 37-42.
- PARMESAN, C.; RYRHOLM, N.; STEFANESCU, C.; HILL, J.K.; THOMAS, C.D.; DESCIMON, H.; HUNTLEY, B.; KAILA, L.; KULLBERG, J.; TAMMARU T.; TENNENT W.J.; THOMAS J.A.; WARREN, M. (1999). "Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming". *Nature*, núm. 399, p. 579-583.
- PEÑUELAS, J.; MATAMALA R. (1990). "Changes in N and S leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last three centuries of CO<sub>2</sub> increase". *Journal of Experimental Botany*, vol. 41, núm. 230, p. 1.119-1.124.
- PEÑUELAS, J.; AZCON-BIETO, J. (1992). "Changes in <sup>13</sup>C of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO<sub>2</sub> increase". *Plant, Cell and Environment*, núm. 15, p. 485-489.
- PEÑUELAS, J. (1993). *El aire de la vida (una introducción a la ecología atmosférica)*. Barcelona: Ariel.
- PEÑUELAS, J.; BIEL, C.; ESTIARTE, M. (1995). Growth, biomass allocation, and phenology of peppers plants submitted to elevated CO<sub>2</sub> and different nitrogen and water availabilities. *Photosynthetica*, vol. 31, núm. 1, p. 91-99.
- PEÑUELAS, J.; IDSO, B.; RIBAS, A.; KIMBALL, B.A. (1997). "Effects of long-term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves". *New Phytologist*, núm. 135, p. 439-444.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. (1998). "Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status". *Trends in Plant Science*, núm. 3, p. 151-156.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; LLUSIÀ, J.; SISCART, D.; 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*, núm. 49, p. 229-238.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; LLORET, F.; PIÑOL, J.; SISCART, D. (2000). "Effects of a severe drought on water and nitrogen use by *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*". *Biologia Plantarum*, núm. 43, p. 47-53.
- PEÑUELAS, J. (2001). "Cambios atmosféricos y climáticos y sus consecuencias sobre el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas terrestres mediterráneos". A: *Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional*. Granada: AEET, CSIC Press., p. 423-455.

- PEÑUELAS, J.; LLUSIÀ, J. (2001). "The complexity of factors driving volatile organic compound emissions by plants". *Biologia Plantarum*, núm. 44, p. 481-487.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. (2001a). "Phenology: Responses to a warming world". *Science*, núm. 294, p. 793-795.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. (2001b). "Herbaria century record of increasing eutrophication in Spanish terrestrial ecosystems". *Global Change Biology*, núm. 7, p. 1-7.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; TOGNETTI, R. (2001a). "Leaf mineral concentrations of *Erica arborea*, *Juniperus communis*, and *Myrtus communis* growing in the proximity of a natural CO<sub>2</sub> spring". *Global Change Biology*, núm. 7, p. 291-301.
- PEÑUELAS, J.; LLORET, F.; MONTOYA, R. (2001b). "Drought effects on mediterranean vegetation and taxa evolutionary history". *Forest Science*, núm. 47, p. 214-218.
- PEÑUELAS, J.; LLUSIA, J. (2002). "Linking photorespiration, monoterpenes and thermotolerance in *Quercus*". *New Phytologist*, vol. 155, núm. 2, p. 227-237.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; COMAS, P. (2002a). "Changed plant and animal life cycles from 1952-2000". *Global Change Biology*, núm. 8, p. 531-544.
- PEÑUELAS, J.; BOADA, M. (2003). "A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain)". *Global change Biology*, núm. 9, p. 131-140.
- PEÑUELAS, J.; GORDON, C.; LLORENS, L.; NIELSEN, T. R.; TIETEMA, A.; BEIER, C.; BRUNA, P.; EMMET, B.; ESTIARTE, M.; GORISSEN, A. (2004). "Non-intrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons and species in a North-South European gradient". *Ecosystems*, vol. 7, p. 598-612.
- PEÑUELAS, J.; LLUSIA, J. (2003). "BVOCs: Plant defense against climate warming?". *Trends in Plant Science*, núm. 8, p. 105-109.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; LLORENS, L.; LLORET, F.; OGAYA, R.; ZHANG, X.; COMAS, P.; ESTIARTE, M.; TERRADAS, J. (2004). "Evidences of complex spatial and temporal phenological responses to rainfall changes". *New Phytologist*, núm. 161, p. 837-846.
- PIÑOL, J.; TERRADAS, J.; LLORET, F. (1998). "Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain". *Climatic Change*, núm. 38, p. 345-357.
- Pons, X. (2001). *Miramón: Geographic Information System and Remote Sensing Software*. Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).
- RODÀ, F.; IBAÑEZ, J.; GRACIA, C. (2003). "L'estat dels boscos". A: *L'estat del Medi Ambient a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya [En premsa].
- RODÀ, F.; MAYOR, X.; SABATÉ, S.; DIEGO, V. (1999). "Water and nutrient limitations to primary production". A: RODÀ, F., RETANA J., GRACIA C., BELLOT J. *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Berlin: Springer, p. 183-194.
- ROOT, T. L.; PRICE, J. T.; HALL, K. R.; SCHNEIDER, S. H.; ROSENZWEIG, C.; POUNDS, J. A. (2003). "Fingerprints of global warming on wild animals and plants". *Nature*, núm. 421, p. 57-60.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C. A. (1994). "Canopy Nutrient Content of a *Quercus ilex* L. Forest: Fertilization and Irrigation effects". *For. Ecol. Mang.*, núm. 68, p. 31-37.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C. A.; 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 Ecol. Manage.*, núm. 162, p. 23-37.
- SARDANS, J.; RODÀ, F.; PEÑUELAS, J. (2004). "Phosphorous limitation and competitive capacities of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* subsp. *Rotundifolia* on different soils". *Plant Ecol.* (enviat).
- STEFANESCU, C.; PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. (2003). "The effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwestern Mediterranean Basin". *Global Change Biology*, vol. 9, p. 1494-1506.
- TERRADAS, J. (1996). *Ecologia del foc*. Barcelona: Proa.
- WALTHER, G. R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J. M.; HOEGH-GULDBERGI, O.; BAIRLEIN, F. (2002). "Ecological responses to recent climate change". *Nature*, núm. 426, p. 389-395.
- WINNET, S. M. (1998). "Potential effects of climate change on US forests: a review". *Climate Research*, núm. 11, p. 39-49.