

# EL CANVI CLIMÀTIC ALTERA I ALTERARÀ LA VIDA ALS ECOSISTEMES TERRESTRES CATALANS

Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Marc Estiarte, Romà Ogaya, Joan Llusà,  
Jordi Sardans, Alistair Jump, Martín Garbulsky, Benjamín Carrillo,  
Constantí Stefanescu, Francisco Lloret i Jaume Terradas

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

*CLIMATE CHANGE IMPACTS ON LIFE IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. An increasing number of observational evidences on the biological effects of climate change are becoming available in Catalonia. Biological spring and winter have been advanced and delayed, respectively. Specifically, the vegetative period has extended about 5 days per decade during the last fifty years. In addition, Mediterranean plants and animals seem to move upwards in Catalan mountains. Many other changes have been observed in the last decades in response to this climatic change: more frequent and severe droughts, greater fire risks, greater biogenic volatile organic compound emissions from our ecosystems, etc. The warming and the precipitation decrease projected for the next decades, if they occur, will affect the physiology, phenology, growth, reproduction, establishment and, finally, the distribution of organisms, and therefore the structure and functioning (e.g., CO<sub>2</sub> uptake or nitrate leaching) of the ecosystems. In fact, experimental studies simulating warming and drought in our forests and shrub lands verify these effects. These changes affect and will affect the multiple productive, environmental and social services provided by the terrestrial ecosystems. Therefore, management policies of ecosystems have to consider these changes projected for the immediate future, such as the decrease of water availability.*

## Síntesi

El canvi climàtic s'afegeix a les moltes pressions a què actualment estan sotmesos els ecosistemes terrestres en general i és clar, també els catalans: canvis en els usos del sòl, altes demandes de recursos i sobreexplotació en uns casos i abandonament en molts altres, deposició de nutrients i contaminants... Tot plegat pot canviar-los i posar-los en perill així com als béns i serveis que proporcionen. L'impacte del canvi climàtic que aquí estudiem serà influït per la gestió que se'n faci i per les interaccions amb aquestes altres pressions.

A Catalunya, com passa arreu del planeta, hi ha ja ara una quantitat substancial d'evidències observacionals i experimentals sobre el lligam entre el canvi climàtic i els processos biològics i físics dels ecosistemes. L'aparició de la primavera s'ha avançat i l'arribada de l'hivern s'ha retardat, de manera que el període vegetatiu s'ha perllongat uns cinc dies per dècada per terme mig durant els darrers cinquanta anys. Com que els canvis han estat diferents per a cada espècie, han variat les habilitats competitives, i es pot esperar que se'n derivin canvis en la composició de les comunitats i desplaçaments en la distribució de les espècies. De fet, ja se n'han descrit al

mateix Montseny on les espècies mediterrànies semblen desplaçar-se cap a altituds més grans. És més probable que es moguin les espècies que no pas els ecosistemes complets, ateses les diferents respostes de cadascuna de les espècies i la possible arribada d'espècies invasores. En els casos més extrems, les poblacions d'algunes espècies són en perill per la sinèrgia entre l'estrès produït pel canvi climàtic, que fa inadequats els hàbitats en què vivien, i per la fragmentació del territori, que en dificulta la migració cap a hàbitats amb condicions adients per a la seva supervivència i que empobreix genèticament les poblacions.

Als ecosistemes terrestres catalans, majoritàriament mediterranis, la disponibilitat hídrica juga un paper cabdal en la composició de la vegetació i en la distribució de les espècies. És clar que una progressiva aridificació com la viscuda (escalfament i augment de l'evapotranspiració potencial sense augment de precipitacions) i la prevista per a les properes dècades (escalfament i, a més a més, disminució de les precipitacions) ha de tenir importants conseqüències per a la fisiologia, fenologia, creixement, reproducció, establiment i, finalment, la distribució dels sers vius, i per tant l'estructura i funcionament dels ecosiste-



mes. De fet, ja s'ha comprovat en estudis experimentals d'escalfament i de sequera, com unes espècies són més afectades que altres, amb la qual cosa s'altera la seva habilitat competitiva i s'acaba alterant la composició de la comunitat. S'ha vist, per exemple, una disminució de la diversitat dels nostres matollars. A més d'aquests canvis estructurals, també s'han trobat canvis funcionals, com per exemple la disminució de l'absorció de  $\text{CO}_2$  produïda per les sequeres o la pèrdua més grans de nutrients en els lixiviatos després de les pluges produïda per l'escalfament. S'han observat molts altres canvis en les darreres dècades com a resposta a aquest canvi climàtic: secades dels boscos més freqüents, majors riscos d'incendis, majors emissions de compostos orgànics volàtils biogènics dels nostres ecosistemes... Aquests canvis afecten i afectaran els múltiples serveis productius (subministrament de béns naturals renovables com ara aliments, medicines, productes fusters, caça, bolets, pastures...), ambientals (manteniment de la biodiversitat, regulació de la composició atmosfèrica i el clima, conservació dels sòls i l'aigua, emmagatzematge de carboni...) i socials (usos recreatius, educatius i de lleure, valors tradicionals culturals, turisme i excursionisme...) proporcionats pels ecosistemes terrestres.

Un dels serveis que més ens preocupa darrerament en les polítiques ambientals és el lligat al balanç de carboni. Les respostes al canvi climàtic i altres factors del canvi global alteraran l'emmagatzematge de carboni als boscos, però l'extensió i la direcció del canvi no estan clars. L'augment de  $\text{CO}_2$  atmosfèric pot augmentar el creixement d'arbres i matolls així com la fullaraca i les arrels i, per tant, la producció primària neta, però els darrers experiments de fumigació amb  $\text{CO}_2$  a l'aire lliure i els duts a terme en les fonts naturals de  $\text{CO}_2$ , és a dir, en condicions naturals i/o a llarg termini, ens indiquen que aquests efectes del  $\text{CO}_2$  poden saturar-se perquè els boscos estan arribant a la seva màxima capacitat i les plantes es poden aclimatar a aquest augment de  $\text{CO}_2$ . L'augment de temperatura pot tenir tant efectes positius com negatius sobre aquest balanç de carboni, en gran part tenint en compte com evolucioni la disponibilitat d'aigua. Als nostres ecosistemes mediterranis on el canvi climàtic fàcilment disminuirà la humitat del sòl, la productivitat pot fàcilment créixer, i, per tant, també l'absorció de carboni. A més a més, la productivitat de l'ecosistema, que inclou la mortalitat dels organismes i la dinàmica del carboni del sòl, i la productivitat del bioma, que inclou perturbacions com els incendis, és menys probable que sigui positiva. Com a resultat de tot això els models preveuen una producció neta mitjana d'uns  $60 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$  pel conjunt dels eco-

sistemes forestals de Catalunya, tant ara com a mitjan de segle, tot i que en aquest darrer cas resulta d'una producció primària bruta i una respiració total quasi 60% més grans que en l'actualitat, com a resultat d'un increment anual del  $\text{CO}_2$  atmosfèric d'un 1%, i de la temperatura de  $0,04^\circ\text{C}$  i d'una disminució de 0,03% de la pluja, valors mitjans previstos per l'IPCC (2007). Com que, a més, tot això disminuirà encara més la reserva hídrica dels sòls, el paper de molts dels nostres ecosistemes terrestres com a embornals de carboni pot veure's seriosament compromès durant les properes dècades. Cal també tenir present que el balanç del carboni ve influït de manera important pels canvis en els usos del sòl, sovint més que no pas pel canvi climàtic, o per l'augment de  $\text{CO}_2$ .

Per a conèixer millor en quin grau s'alteren i s'alteraran el funcionament i l'estructura dels ecosistemes mediterranis, es duen a terme i s'han de dur a terme més estudis, les condicions experimentals dels quals s'han d'apropar al més possible a les naturals, i s'han d'aprofitar els avenços tecnològics per aplicar-los a les diferents escales temporals i espacials que ens donin idea de l'abast de l'alteració dels processos. Aquests estudis han d'abastar des dels períodes més remots als del futur més immediat, tot passant per les darreres dècades, fins a l'actualitat, i des dels estudis descriptius als experimentals tot passant per la modelització en l'espai i el temps.

En els propers anys, i per pal·liar tant els efectes del canvi climàtic com l'augment de  $\text{CO}_2$  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 més demanda d'uns ecosistemes més actius. La gestió dels espais forestals, i dels naturals en general, ha d'incorporar una escala de paisatge, on s'inclougui 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 perturbacions, com per exemple els incendis forestals.

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

L'efecte hivernacle està produint i sembla que ha de produir un augment de la temperatura i de l'eixut a les nostres contrades. Per a 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 al més possible a les naturals, en els que s'aprofiten els avenços tecnològics per aplicar-los a les diferents escales temporals i espacials que ens donin idea de l'abast de l'alteració dels processos.

L'estudi dels efectes que aquests canvis climàtics tenen sobre els nostres ecosistemes terrestres es duu a terme mitjançant cinc tipus d'activitats que recorren diferents escales temporals. Abasten des dels períodes més remots als del 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, (2) l'estudi de material històric divers, com ara espècimens d'herbari, peces de museu, arxius, anells dels arbres..., dels darrers segles, (3) l'estudi dels canvis ecofisiològics, biogeoquímics i demogràfics dels nostres ecosistemes en resposta a les canviants condicions climàtiques de les darreres dècades i anys, (4) l'estudi experimental dels nostres ecosistemes sota condicions més o menys controlades simuladores dels canvis previstos per a les properes dècades pels models climàtics, i, finalment, (5) la modelització dels canvis passats i futurs, en l'espai i en el temps.

Els estudis paleoecològics de testimonis sedimentaris ens 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 des de períodes humits a més secs, amb canvis dramàtics de vegetació i 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, que ens il·lustren de 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, que indica una possible adaptació a les condicions més càlides i àrides de l'actualitat mitjançant una millor eficiència en l'ús de l'aigua.

A part d'emprar eines paleoecològiques i històriques per moure'ns en el temps, els estudis del canvi climàtic i dels seus efectes requereixen anar ascendint successivament

en l'escala espacial des de la fulla fins l'ecosistema, la regió i el globus sencer. Per estudiar què passa a escala regional i planetària s'empren tècniques de teledetecció. Aquestes tècniques es basen en el fet que la llum reflectida, després d'incidir en un material, presenta diferents característiques que depenen tant del tipus de material com del seu estat. 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. D'aquesta manera, i des de fa unes dècades, s'estudia l'evolució de les masses vegetals any rere any. 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 disposem d'espectroradiòmetres més sensibles, capaços de mesurar amb alta resolució espectral, nanòmetre a nanòmetre, i espacial, i aportar així informació sobre el contingut hídric i la fisiologia de la vegetació. Tot això és especialment interessant, per exemple, per a l'estudi dels nostres ecosistemes mediterranis, sovint amb la biomassa foliar verda tot l'any. Les noves eines ens 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, o els canvis interanuals. Així doncs, en l'estudi dels efectes ecològics del canvi climàtic i dels altres components del canvi global, com ara els importants canvis en els usos del sòl, convé no desaproveitar 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 si segueix el canvi climàtic com preveuen els models climàtics de l'IPCC. I en aquesta mateixa escala temporal, el que ens interessa ara és repassar el que ha ocorregut en les darreres dècades, en els darrers anys en els ecosistemes terrestres del nostre país en resposta i en interacció amb aquest fenomen que coneixem com el "canvi climàtic" associat al "canvi atmosfèric" produït per l'activitat humana.

### **El canvi climàtic de les darreres dècades. Catalunya s'escalfa i eixuga**

Aquestes darreres dècades, el planeta Terra s'ha escalfat. Ho ha fet en mitjana 0,6-0,7°C, però a molts indrets del nostre país, l'augment ha superat amb escreix 1°C. 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. Com a resultat, s'han produït i es continuen produint tota una sèrie de canvis de caràcter global entre els que destaca, pels seus efectes sobre els organismes i els ecosistemes, aquest escalfament.

Com a conseqüència de l'absorció de la radiació infraroja pels gasos hivernacle, com ara el CO<sub>2</sub> o el metà, i del seu continuat increment, 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 han generat aquest any el quart informe del Panell Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic patrocinat per l'ONU, algunes conclusions del qual mereixen atenció. Les evidències de l'escalfament de la Terra i d'altres canvis en el sistema climàtic són ara encara més clares i contundents que les recollides al segon i al tercer informe. Les dues últimes dècades han estat les més càlides de l'últim mil·lenni. Ha disminuït la superfície gelada de l'Àrtic en un 15% en 50 anys, el nivell del mar ha pujat uns 15 cm aquest segle passat, ha canviat el règim de precipitacions en algunes regions, i ha augmentat la freqüència i la intensitat d'alguns fenòmens com "el Niño". Tots aquests canvis sembla que s'accentuaran a les properes dècades, ja que l'atmosfera segueix canviant a causa de la nostra activitat, una activitat que, com hem assenyalat, creix exponencial-

ment i segueix basada en la combustió de materials fòssils. Es preveu un augment d'1 a 5°C durant aquest segle, depenent de l'evolució de les emissions dels gasos hivernacle.

Al nostre país, la temperatura mitjana de molts llocs ha augmentat més d'1°C els últims 50 anys, i, sembla que el "bon temps" arriba abans. Les temperatures que fa 50 anys es registraven a primers d'abril, es donen ara a primers de març. Tot i que la precipitació no ha disminuït en les darreres dècades, l'augment de temperatura causa una evapotranspiració més gran, de manera que moltes de les localitats i regions mediterrànies són ara més càlides i més seques que a les dècades anteriors. A l'observatori de Roquetes, al segle XX, l'evapotranspiració potencial ha augmentat 13 mm i la humitat relativa ha disminuït 0.85% per dècada. I tot i que les prediccions climàtiques, especialment les relatives a la precipitació, es fan extremadament complexes en l'àmbit local i regional, els 1-3°C d'increment en les temperatures previstes per molts models de circulació global a la regió mediterrània per a mitjan del segle XXI, augmentaran encara més l'evapotranspiració.

### Canvis temporals: El primer que s'altera són els cicles vitals dels éssers vius

La nostra activitat i l'activitat de tots els organismes vius està fortament influïda per la temperatura. No podem esperar altra cosa que alteracions d'aquesta activitat. No ens

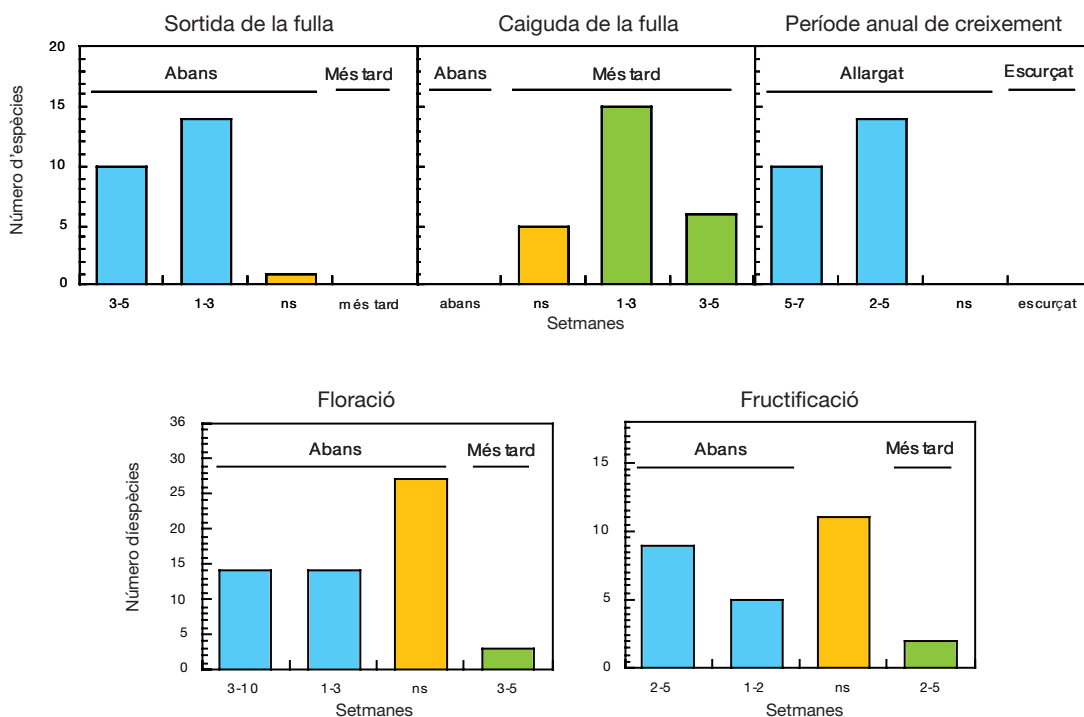


Figura 1. Freqüència d'espècies vegetals i animals amb fenologia alterada durant les darreres cinc dècades (des del 1952 al 2000) a Cardedeu (Vallès Oriental) (Peñuelas et al., 2002).



estranyarà, així doncs, que l'escalfament s'hagi traduït ja en canvis significatius en els cicles vitals de plantes i animals. Recordem que el pas per les diferents fases depèn, entre altres factors, de la temperatura acumulada, del que el biòlegs anomenem graus-dia, és a dir, del total d'energia requerida per un organisme per a desenvolupar-se i passar d'un estadi a l'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 de tot el món, des dels ecosistemes freds i humits fins als càlids i secs, tot observant els registres fenològics disponibles. Aquests canvis fenològics (fenologia és la ciència que estudia els cicles vitals dels organismes) s'han convertit en el símptoma més clar que el canvi climàtic ja afecta la vida.

El nostre país és un dels llocs on els canvis fenològics observats són més importants. Però d'observacions com les aquí trobades (fig. 1) també n'hi ha, amb resultats comparables, arreu del món, tot i que predominin als països rics, amb més gran nombre d'investigadors i més tradició científica. Aquí, a Catalunya, les fulles dels arbres surten ara de mitjana uns 20 dies abans que no pas fa una cinquantena d'anys. Per exemple, la pomera, l'om, o la figuera sembla que treuen les fulles amb un mes d'antelació, i l'ametller i el pollancre, uns 15 dies abans, encara que n'hi ha d'altres, 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. I els cicles vitals dels animals també són alterats. Per exemple, l'aparició d'insectes, que passen pels diferents estadis larvaris més ràpidament en resposta a l'escalfament, s'ha avançat 11 dies. Els amants de les papallones ho hauran notat. Apareixen abans, són més actives i allarguen el seu període de vol (fig. 2). Tota aquesta activitat prematura de plantes i animals pot posar-los en perill per les gelades tardanes. Però també la freqüència d'aquestes gelades ha canviat; ha disminuït en aquest ambient cada cop més calent. Per exemple, a Cardedeu tenien de l'ordre de 60 gelades anuals fa cinquanta anys i ara han passat a tenir-ne de l'ordre de 20, i per tant també ha disminuït el risc de malmetre fulles i flors joves. Respostes similars en l'avançament de les fenofases de plantes i animals (invertebrats, amfibis, ocells...), d'uns 3-4 dies per dècada a la primavera, han estat descrites darrerament a molts altres indrets del planeta, de manera que aquest sembla ser un fenomen general, amb la variabilitat regional, local i específica pròpia de tot fenomen biològic.

### ...i com a resultat arriben les alteracions de les comunitats

Tots aquests canvis fenològics no són simples indicadors del canvi climàtic. 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 (fig. 3).

Com que la natura no és homogènia, les respostes a l'escalfament són diferents dependent 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 tan heterogènies al canvi climàtic poden produir importants desincronitzacions 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 el tenim en el que els passa a les aus migratòries. El canvi climàtic sembla que també ha alterat els seus hàbits. Atès l'avançament en la floració i fructificació de les plantes i en l'aparició dels

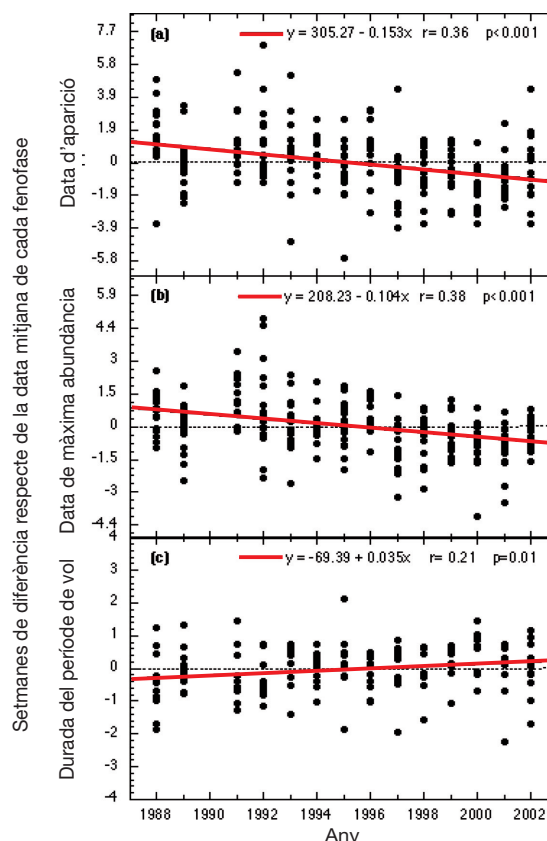


Figura 2. Canvis en l'aparició, el pic d'abundància i la durada del vol de 13 espècies de papallones als Aiguamolls de l'Empordà durant els darrers 15 anys (Stefanescu et al., 2003).



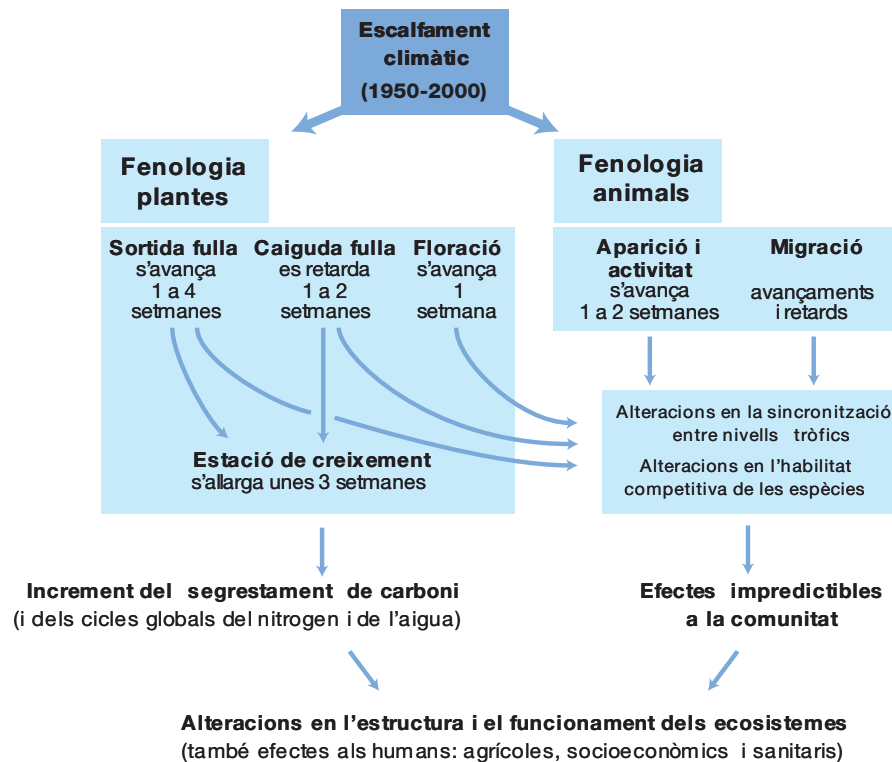


Figura 3. Efectes ecològics dels canvis fenològics produïts pel canvi climàtic. (segons Peñuelas i Filella, 2001)

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. I, malgrat tot, 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. El retard segurament ve determinat pel canvi climàtic al lloc des d'on parteixen, les regions subsaharianes, o a les regions que creuen en la seva ruta migratòria. Així, la sequera i la desforestació del Sahel, i la conseqüent 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 en pot ser una conseqüència. D'altra banda, hi ha espècies abans migratòries que aprofiten que el nostre hivern és cada vegada més suau i ja no se'n van de la Península. Aquest és el cas de la puput o de les cigonyes.

### ..., i de l'activitat dels ecosistemes i de la biosfera

Quan ens mirem els canvis fenològics a escala global ens trobem amb alteracions tan

importantes com ara l'augment en un 20% de l'activitat biològica del nostre planeta en els últims 30 anys a causa en gran part a aquest allargament fenològic del període productiu. Ho apreciem tant en les imatges dels satèl·lits d'observació de la Terra, com en les dades de concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>. Pel seguiment de les masses vegetals des de l'espai s'empra un índex de vegetació normalitzat, el NDVI, en acrònim anglès àmpliament usat també a casa nostra, ja quasi plenament incorporat a la nostra llengua. Aquest índex es basa en el quocient entre la radiació infraroja i la roja que la superfície terrestre reflecteix cap a l'espai. Quant més gran és aquest quocient, més gran és la biomassa verda. Doncs bé, aquest 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 això s'ha traduït en un augment de la biomassa verda, com a mínim a latituds superiors als 40°. L'increment de la productivitat vegetal de les darreres dècades, que havíem atribuït a l'efecte fertilitzador del CO<sub>2</sub> i de les deposicions de nitrogen, pot ser degut 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 ens 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 primaveral



més gran de la concentració de CO<sub>2</sub>. 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 C, ara tan important a la llum dels protocols de Kioto.

### **Altres canvis als nostres ecosistemes en resposta al canvi climàtic i a les interaccions d'aquest amb altres components del canvi global**

Els ecosistemes terrestres catalans presenten una gran variabilitat climàtica, una important complexitat topogràfica, uns marcats gradients en els usos del sòl i en la disponibilitat d'aigua, i una gran biodiversitat. Segurament per tot això són especialment sensibles als canvis atmosfèrics i climàtics, i als canvis en usos del sòl, demogràfics i econòmics.

El canvi climàtic augmenta l'estrès hídric de la nostra vegetació, la qual sovint ja viu 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 nostres ecosistemes com ara els incendis forestals o l'emissió de compostos orgànics volàtils. I a més 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> atmosfèric.

#### *Més sequeres severes*

Els models GCM preveuen per al nostre país un augment de la freqüència i intensitat dels períodes de sequera. Dels efectes de períodes càlids i secs en tenim un exemple recent en el calorós i sec 1994. Aquest episodi va afectar profundament la vegetació mediterrània. Va danyar severament molts boscos i matollars de la península Ibèrica (80% de les 190 localitats peninsulars estudiades presentaven espècies danyades). Les alzines, per exemple, es van assecar en moltes localitats de Catalunya. 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 presentar un menor ús de l'aigua que tenien disponible, i es va afavorir la pèrdua dels nutrients del sòl, una conseqüència secundària greu tenint en compte que aquests ecosistemes solen ser limitats pels nutrients (principalment fòsfor als sòls calcaris i nitrogen als silícics). La diferent severitat dels efectes sobre els diferents boscos del país va venir donada entre altres factors per 1) l'orien-

tació dels vessants (més afectació als solells), 2) la litologia del sòl (menor afectació als sòls profunds i penetrables per les arrels com per exemple els esquists), 3) l'espècie dominant (més afectació d'alzines que de falsos alders, que creixen menys, però són més resistents a l'embolisme, són més eficients en l'ús de l'aigua, i dissipen millor l'excés d'energia, i 4) la gestió forestal (boscos aclarits menys afectats que els densos).

El grau d'afectació fou diferent depenent del tipus funcional i de la història evolutiva de les distintes espècies. 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, *Pistacia*, *Olea*, *Juniperus*, *Pinus* i *Quercus*, majoritàriament arbres. Tot i així, els gèneres mediterranis es recuperaren molt millor després d'uns anys de més disponibilitat hídrica. Els gèneres mediterranis postpliocè semblen més adaptats per a respondre a un ambient no fàcilment previsible amb una gran variabilitat estacional i interanual i subjecte a pertorbacions freqüents. Entendre aquestes respostes és important per a preveure la futura composició de les comunitats si segueix el canvi climàtic.

#### *Més incendis*

Aquestes condicions més càlides i més àrides, juntament 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 d'"urbanites" no avesats al bosc, augmenten la freqüència i intensitat dels incendis forestals. 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, hi ha d'haver 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. Els incendis, que han augmentat al llarg del segle XX, ja ara constitueixen una de les pertorbacions més importants en els ecosistemes mediterranis.

La relació vegetació-foc és complexa. 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



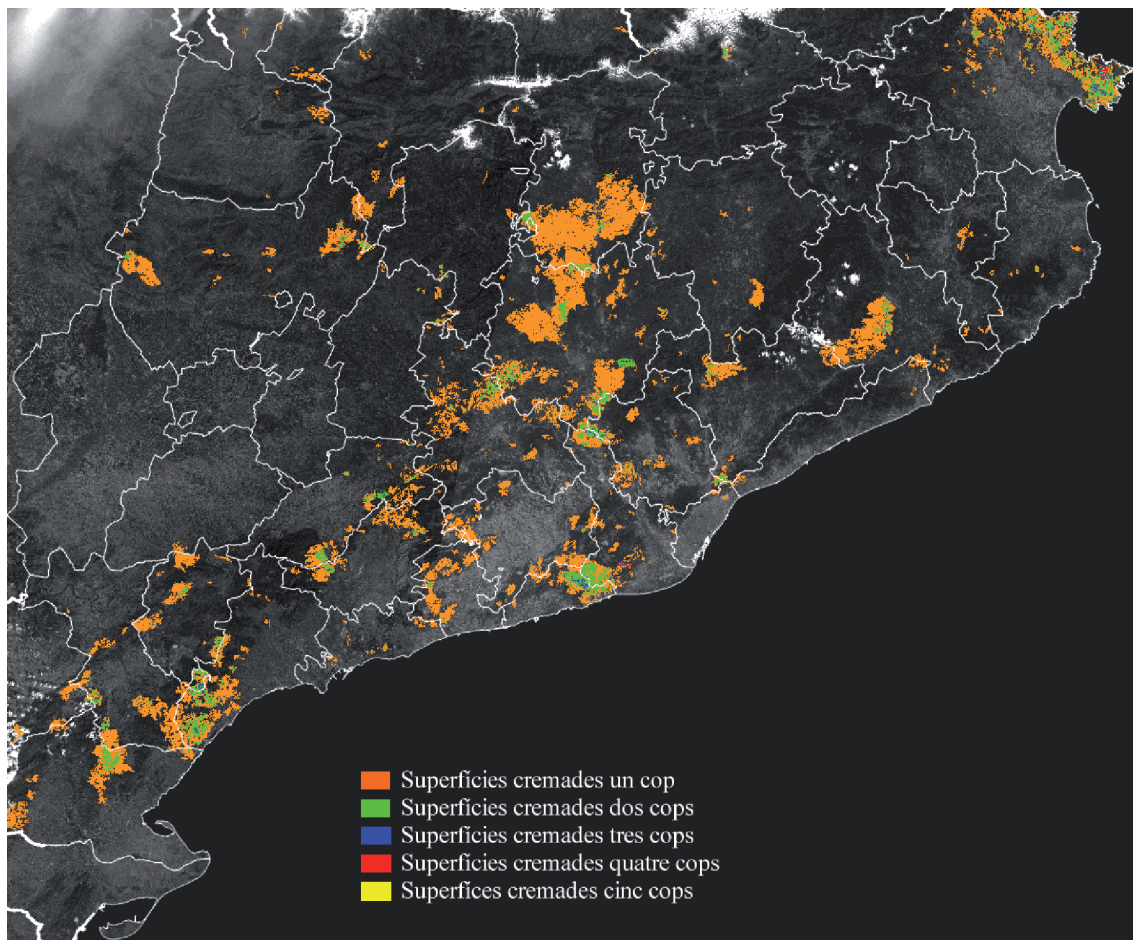


Figura 4. Recurrència dels incendis forestals a Catalunya entre el 1975 i el 1995. (segons Díaz-Delgado et al., 2002).

de regeneració que, segons l'escala d'espai i la recurrència dels incendis, poden donar diversitat. Per altra banda, el foc ocasiona pèrdues de nutrients de l'ecosistema, afecta negativament espècies de requeriments forestals estrictes i a 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 ombròfiles, i els focs acaben per mantenir comunitats en estadis successional primers. De fet, a totes les regions mediterrànies del món, els incendis són considerats un factor ecològic i evolutiu dominant. La vegetació mediterrània ha evolucionat amb els incendis, fins al punt que poden ser fins i tot beneficiosos per a la seva regeneració,

però, tot i així, atès que la recurrència dels incendis està augmentant (algunes àrees de Catalunya experimenten incendis reiterats, fins a 3-5 incendis en un mateix punt durant els darrers 20 anys, fig. 4), les comunitats poden acabar sense temps per a recuperar-se, per exemple, i que es cremen abans que els nous individus puguin arribar a adults i reproduir-se.

I en tot cas, els incendis contribueixen a una reducció del contingut de matèria orgànica del sòl, la qual, al seu torn, pot disminuir la mida i l'estabilitat dels agregats del sòl. Com que, a més, hi ha una disminució de la coberta vegetal, pot reduir-se la infiltració de l'aigua al sòl i incrementar-se l'escorriment superficial. Tot plegat facilita l'erosió del sòl. 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.

El risc d'incendis intensos i les seves conseqüències no desitjades és, doncs, molt alt als nostres ecosistemes, sobretot als més mediterranis, i als més madurs, on la fracció





de combustible mort (amb menor humitat) augmenta significativament. Per això, s'han proposat diverses estratègies de gestió contra els focs intensos: pràctiques de crema freqüent podrien ser adients per a les comunitats joves mentre que aclarir mecànicament seria més adequat per a 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 mig termini és bàsica 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.

### Més emissió de compostos orgànics volàtils

L'augment de temperatura té molts altres efectes directes sobre l'activitat dels organismes vius. Un d'important ambientalment és l'augment exponencial de l'emissió biogènica de compostos orgànics volàtils (COV). Aquestes emissions biogèniques de COV afecten la química atmosfèrica, no solament pel que fa al cicle del carboni (emissions d'unes 1.500 Tg C any<sup>-1</sup>) o la formació d'aerosols, sinó pel seu paper en l'equilibri oxidatiu de l'aire (nivells de OH, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>...). Les emissions resulten 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 tissular, 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 manca 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 quelcom tan important ambientalment com és l'emissió biogènica de COV. A més de la temperatura i de la disponibilitat hídrica, altres factors lligats amb el canvi climàtic i amb el canvi global controlen les emissions (fig. 5). 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 retroalimentació positiva de la contaminació per ozó.

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

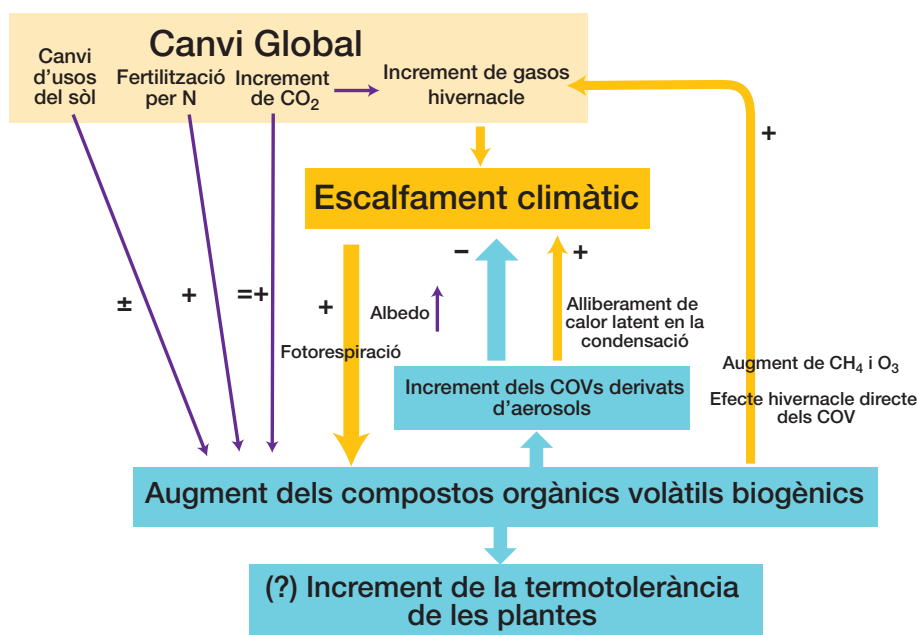


Figura 5. Interaccions entre els factors de canvi global i canvi climàtic i les emissions de COV. (Basat en Peñuelas i Llusià, 2003)



res de l'estiu. Però a més de "refrigerar" la planta, aquestes emissions de COV podrien retroalimentar negativament l'escalfament del mateix clima atmosfèric, en actuar com aerosols que disminueixen la irradiància. Caldria estudiar-ho, perquè també podrien retroalimentar positivament l'escalfament a través del seu efecte hivernacle directe, en absorbir la radiació infraroja, i indirecte, en allargar la vida mitjana del metà i altres gasos hivernacle. Estem davant d'un exemple més de l'important paper que juguen els ecosistemes sobre el mateix clima i el possible canvi climàtic, a part del més conegut i important efecte sobre el balanç del CO<sub>2</sub> a l'atmosfera.

#### Més nitrats a l'aigua

Recordem que els processos biogeoquímics depenen de la temperatura i que entre ells podem citar-ne un altre que ara preocupa com a component important del canvi global arreu del món i a moltes comarques catalanes en particular: la progressiva eutrofització, és a dir, l'enriquiment en nutrients, sobretot nitrats, en el nostre país, en especial a les aigües subterrànies. Aquí va lligada en molts casos a l'excés de purins, però l'augment de temperatura, o les sequeres no són del tot alienes a aquest fenomen. L'escalfament augmenta la mineralització, i la sequera impedeix l'ús de nutrients per part de les plantes i facilita les pèrdues del sistema quan arriben les pluges. De fet, els resultats d'estudis experimentals en matollars mostren com l'escalfament, i també la sequera, augmenten l'alliberament de nitrats als lixiviats del sòl (fig. 6).

Un altre exemple d'alteració biogeoquímica el tenim en l'estimulació de la descomposició per l'escalfament. La falta d'aigua, en canvi, l'alenteix. Convindrà que s'estudii el balanç de la interacció d'aquests dos factors sobre el cicle de la matèria i el funcionament dels nostres ecosistemes mediterranis.

#### Tot plegat porta a canvis estructurals i de distribució espacial

Tots aquests canvis funcionals en resposta al canvi climàtic 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 capacitat 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'evo-

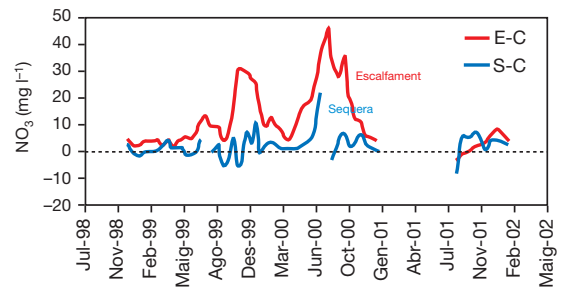


Figura 6. Exemple de canvi funcional ecosistèmic produït pel canvi climàtic a un matollar de bruguera holandès: Alliberament de nitrats a l'aigua del sòl en resposta a un escalfament del voltant d'un grau centígrad i a una disminució del 33% de la humitat del sòl. Es representa la diferència respecte a parcel·les control. (E-C diferència entre escalfament i control; S-C diferència entre sequera i control) (Basat en Emmet et al., 2004)

lució. A les muntanyes, les espècies poden respondre al canvi climàtic migrant verticalment distàncies curtes (per exemple, són suficients 500 m per contrarestar un augment de 3°C).

A Catalunya i en general a tot el planeta, ja s'han apreciat mitjançant estudis paleoecològics nombrosos desplaçaments de les àrees de distribució d'algunes espècies i formacions vegetals en resposta a canvis climàtics pretèrits. Però encara no hi ha pas massa evidències en 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 del 1945 i s'ha pogut apreciar que els ecosistemes mediterranis guanyen terreny als temperats. Les condicions progressivament més càlides i àrides, però també els canvis d'usos del sòl, principalment l'abandonament de la gestió tradicional, com ara la pràctica desaparició dels incendis associats a la ramaderia (ara són 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 a adaptar-se al canvi climàtic, però solament si existeixen ecosistemes contigus no pertorbats, el que ens recorda la importància de la fragmentació dels ecosistemes naturals com un altre factor del canvi global. I la fragmentació és elevada a moltes contrades del nostre país. Només cal observar una foto aèria de les comarques de Barcelona. Pel que fa a les muntanyes, la migració cap a altituds més grans comporta una reducció concomitant en l'àrea total de cada hàbitat, per la qual cosa les espècies amb més requeriment d'àrea poden extingir-se.

Aquests efectes de l'escalfament no ens han d'estranyar perquè és ben conegut que



els règims climàtics determinen la distribució de les espècies i dels biomes a través dels llinars 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, els animals no són pas menys sensibles. Al contrari, responen més ràpidament, atesa la seva mobilitat. S'han documentat força desplaçaments d'espècies animals relacionats amb el clima. Se n'han descrit cap al pol de 35 a 240 km durant el segle XX en 34 espècies de papallones amb distribució europea, incloent-hi àrees catalanes.

### **El futur dels nostres ecosistemes terrestres davant el canvi climàtic previst per a les properes dècades**

Entre els ecosistemes terrestres del país, els boscos i matollars s'han estès les darreres dècades com a resultat de l'augment de temperatura, de l'augment de CO<sub>2</sub>, i/o de l'augment de fertilitzants a l'ambient (eutrofització), però 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, aquests ecosistemes terrestres són en l'actualitat en una part important 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, formant 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 dels nostres boscos, no és clar del tot. El que sí podem dir 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 1.217.599 ha, l'equivalent al 38% del país.

La disponibilitat hídrica és el factor crític per avaluar els efectes del canvi climàtic sobre aquests 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 apreciada en estudis recents, fenòmens associats a l'increment de la temperatura, comportaran un augment de l'aigua transpirada que s'afegeix a més evaporació potencial resultant de l'augment de tempera-

tura. En aquells llocs on el bosc disposa d'aigua suficient per compensar aquesta demanda hídrica més gran, és de preveure que augmenti la producció forestal. Ara bé, als llocs amb dèficit hídric, que representen la major part 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. En casos extrems, àrees actualment ocupades per bosc poden ser substituïdes per matollar, i àrees actualment ocupades per matollars poden patir erosió.

Al nostre país es duen a terme estudis experimentals en què es manipula experimentalment la temperatura i la disponibilitat d'aigua de l'ecosistema per a estudiar els canvis funcionals i estructurals que en resultarien si es complissin les previsions dels models climàtics d'un augment de la temperatura i d'un eixut creixent al sud d'Europa. Entre els ecosistemes terrestres, que són els que més abunden al nostre país, els boscos i els matollars mediterranis també són, segurament per això mateix, els més estudiats en relació al que aquí ens ocupa: la resposta al canvi climàtic.

#### *Els boscos mediterranis*

Com és ben sabut, la disponibilitat hídrica constitueix un dels factors més determinants del creixement i la distribució de les espècies vegetals mediterrànies. Els models de canvi climàtic preveuen un augment de la temperatura a les zones de clima mediterrani com la nostra, la qual cosa implicaria un augment en 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'escorriment 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 als mateixos boscos de Prades en què en uns experiments de fertilització i irrigació es va comprovar que l'aigua va afectar el creixement diametral; i el nitrogen, la dinàmica foliar. El



tractament de sequera actual ha reduït el creixement diametral dels troncs en un 37%, però no totes les espècies són afectades per igual. Algunes resulten força sensibles com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren respectivament, un creixement diametral 77% i 55% més baix en condicions de sequera, mentre que d'altres, com *Phillyrea latifolia*, no experimenten cap disminució apreciable en el creixement diametral (fig. 7). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quercus 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%.

Per tant, l'experiment ha posat de manifest que sota condicions més àrides que les actuals, els boscos mediterranis poden minvar bastant les seves taxes de creixement i per tant la seva capacitat per a segrestar carboni atmosfèric. A més, com que no totes les espècies vegetals en resultarien igualment afectades, a llarg termini hi podria haver un canvi en la composició específica del bosc, i en resultarien 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 a 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 ens 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: de rebrotos i de plàntules de 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 rebrotos d'alzina. Aquestes diferències, però, desapareixen amb el desenvolupament de les noves plantes, de manera que la supervivència de plàntules i rebrotos 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 considerem que la supervivència de noves plàntules de moltes d'aquestes espècies, com per exemple l'alzina, depenen de trobar condicions en què no quedin exposades en excés a la radiació, sobretot en els estadis inicials. Si disminueix molt la cobertura arbòria a causa

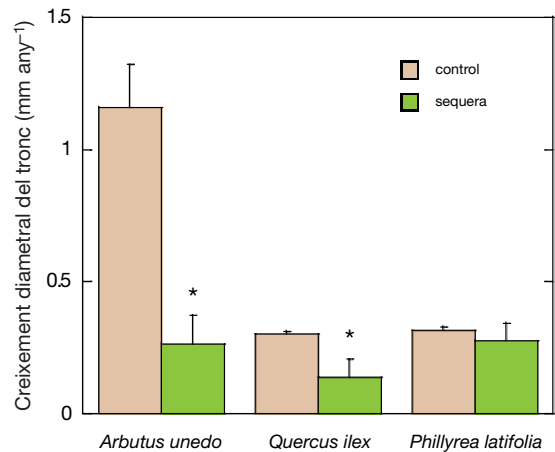


Figura 7. Diferent resposta a la sequera (disminució del 15% de la humitat del sòl) en les tres espècies dominants de l'alzinar de Prades. (Basat en l'estudi Ogaya et al., 2003).

del canvi climàtic, també pot ser que disminueixi la disponibilitat d'àrees on les plàntules es puguin instal·lar.

#### *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 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 (llum, vent o humitat relativa) o fins i tot d'una part de l'ecosistema (sòl). Una tècnica nova, l'*escalfament nocturn passiu*, és el que ara s'empra a les brolles del Parc Natural del Garraf, en què es manipula la temperatura de l'ecosistema tot evitant aquests inconvenients.

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 retinguda una part de l'energia acumulada per l'ecosistema durant el període de llum solar. Amb aquesta metodologia s'augmenta al voltant d'1°C 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.

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



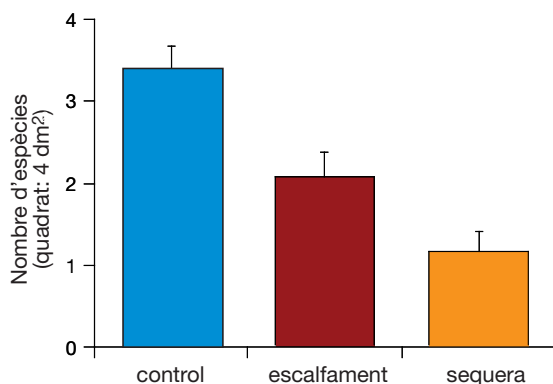


Figura 8. Exemple de canvis ecosistèmics estructurals produïts pel canvi climàtic: Disminució de la densitat d'espècies reclutades en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1°C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl de 20% (basat en l'estudi de Lloret et al., 2004).

sequera. 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 són també dependents de l'espècie, i fins i tot de l'individu.

La diferent direcció de la resposta a l'escalfament segons 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.

L'experiment de Garraf representa una de les localitats més eixutes i càlides d'un projecte a escala europea d'estudi dels 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 entre 0-24% la respiració del sòl 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 retarda la descomposició.

Es comprova així doncs que els canvis de temperatura i d'humitat afecten el desenvolupament de la vegetació i el funcionament dels ecosistemes, per exemple alterant els cicles del carboni o del N o els balanços d'energia. La figura 6 ens 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 d'escalfament duts a terme al Garraf indiquen que la sequera fa disminuir el nombre de plàntules i la seva respectiva riquesa d'espècies (fig. 8). Aquesta disminució també es dona, però en

proporcions molt menors, 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 espècies 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.

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 l'indiar 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 dècades vinents 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 disponible a causa de les inherents variabilitat i impredecibilitat del sistema climàtic a escala regional i en especial a la nostra regió mediterrània. Convindrà també 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, i tal com ja s'ha assenyalat, l'abandonament de terres de cultiu i la fragmentació dels ecosistemes com dos grans canvis en els usos del sòl (i la variació del règim de focs). Amb tot això, podem preveure que si continuen les coses com ara, a les properes dècades és fàcil que hi hagi més ecosistemes en estadis successional primers i de menor complexitat ecològica.

#### *I en casos extrems, erosió i desertització*

Les disminucions de la productivitat vegetal i de la reproducció en resposta a la sequera (o en menor grau a l'escalfament) es tradueixen en una disminució de la matèria orgànica que arriba al sòl, i també del reclutament de noves plantes i del recobriment del sòl, tots ells fenòmens que produeixen una disminució de la seva capacitat de retenir l'aigua. Si el contingut d'aigua del sòl minva, disminueix la productivitat de la vegetació, i disminueix encara més l'entrada de matèria orgànica en un cercle viciós que es retroalimenta. Les dis-



minucions 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 erosió són els més greus per als matollars mediterranis, especialment a les zones més àrides.

Com més àrida és l'àrea considerada, més triga la vegetació a recuperar-se després de sequeres múltiples i prolongades i /o d'incendis, tant perquè triga molt a 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. Es facilita així l'erosió i, en casos extrems, es pot arribar a la desertització, un problema present ja en zones on els sòls dels ecosistemes degradats són incapaços 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 a zones similars sense terrasses. Les àrees cremades del sud de Catalunya i, sobretot, de més al sud encara, al País Valencià, són susceptibles de patir erosió perquè en una gran proporció es localitzen a camps generalment sobre substrats margosos molt sensibles a l'erosió, on la precipitació és poca (350-600 mm, o menys) i principalment concentrada a la tardor, i, on atès el previ ús agrícola, hi ha un menor nombre d'espècies rebrotadores. 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 els serveis dels ecosistemes poden ser alterats profundament.

### **Béns i serveis dels ecosistemes terrestres. Alteració pel canvi climàtic i gestió**

Des del punt de vista antròpic, els ecosistemes terrestres són sistemes multifuncionals, que compleixen tres grans tipus de funcions: productives, ambientals i socials. En la seva funció productiva, subministren béns naturals renovables, com els aliments, les medicines, els productes fusters 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 ex. prevenció de l'erosió), o l'emmagatzematge de

carboni. Entre les funcions socials, les més rellevants són els usos recreatius, educatius i de lleure, les oportunitats per a la recerca, els seus valors tradicionals culturals i emocionals, així com el paisatge agradable que constitueixen, funcions que donen peu a activitats econòmiques importants com el turisme i l'excursionisme. Està clar que els canvis que produeixen els canvis climàtic i atmosfèric tindran un impacte sobre molts d'aquests béns i serveis i, per tant, impactes sobre els sistemes socioeconòmics, i també està clar que les influències del canvi climàtic són difícils de separar de les dels altres components del canvi global com els canvis atmosfèrics, o els canvis en els usos del sòl.

*Per als propers anys: més estudis i més i millor gestió*

Amb tots aquests estudis veiem com els canvis atmosfèrics i climàtics afecten de manera important el funcionament i l'estructura dels nostres ecosistemes terrestres tant pels seus efectes propis com per les seves interaccions. Per tal de conèixer i gestionar millor en quin grau ho fan, són necessaris nous estudis experimentals en condicions al més properes possible a les naturals, i 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 s'han de buscar les sinèrgies pròpies de la multidisciplinarietat.

En qualsevol cas, els ecosistemes mediterranis presenten una extraordinària varietat en l'espai i el temps, a més d'una gran resiliència. Aquesta heterogeneïtat multidimensional i resiliència són el resultat de la coevolució amb els humans i les seves activitats i els seus paisatges culturals. Constantment evolucionen modificats pels focs, els humans, i el seu bestiar i les seves eines. I ara, a més, pel canvi climàtic. La dinàmica dels nostres ecosistemes, gairebé tots seminaturals, es pot entendre com una sèrie de degradacions antropogèniques i 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 d'estratègies d'ús multiple per a la gestió i rehabilitació dels ecosistemes terrestres mediterranis requereix un gran esforç educacional, de recerca i governamental per a donar esperança al futur desenvolupament d'alguns d'aquests negligits i desolats ecosistemes terrestres com ara 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 decreixent disponibilitat hídrica com a conseqüència tant de la disminució de les precipitacions i/o l'augment de l'evapotranspiració potencial com de la demanda més gran 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 inventariat 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 urgentment necessàries, però escasses.

- Per a pal·liar el canvi climàtic a través de més captació i menor pèrdua de CO<sub>2</sub> s'hauria d'actuar sobre l'aforestació i la reforestació com s'ha assenyalat 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 quan es defineixen 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 interaccions amb els ecosistemes terrestres, tenim el 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 del 1994 per conscienciar dels efectes d'una reducció d'aigua en els nostres ecosistemes. En aquests i en tots els altres termes esmentats s'haurien de difondre les activitats de recerca en els 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.

### Instal·lats en el canvi

El nostre país, com el nostre planeta, com l'univers, està instal·lat 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 coneixem com "Canvi Global". De totes maneres, molts d'aquests grans canvis s'han produït a escala geològica, moltes vegades de milions d'anys, mentre que l'ac-

tual és dels especials perquè és un canvi accelerat que s'està produint en poques dècades. I és important recordar que tots els canvis descrits en aquestes darreres dècades han tingut lloc 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 poden ser encertats. És cert que haurem d'esperar a veure què ens porten els propers anys, i àdhuc podria arribar a passar que els models fallessin d'alguna manera (la màquina climàtica, i la vida són immensament complexes, sovint no lineals), però de moment, el que veiem és que la biosfera bateja 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 actui algun factor limitant: aigua, llum, contaminació..., o canvis en el comportament dels humans..., forçats o lliures. Seria com a mínim poc intel·ligent esperar sense actuar a veure si la calor, la sequera i les pluges torrencials desertitzen les nostres terres o la mar engoleix el delta de l'Ebre.

### Bibliografia

- DÍAZ-DELGADO, R., LLORET, F., PONS, X. i TERRADAS, J. (2002). Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology*, 83: 2293-2303.
- EMMET, B., BEIER, C., ESTIARTE, M., TIETEMA, A., KRISTENSE, H.L., WILLIAMS, D., PEÑUELAS, J., SCHMIDT, I. i SOWERBY, I. (2004). The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems*, 7: 625-637.
- LLORET, F., PEÑUELAS, J. i ESTIARTE, M. (2004). Experimental evidence of reduced diversity of seedlings due to climate modification in a Mediterranean-type community. *Global Change Biology*, 10: 248-258.
- OGAYA, R., PEÑUELAS, J., MARTÍNEZ-VILALTA, J. i MANGIRÓN, M. (2003). Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain. *Forest Ecology and Management*, 180: 175-184.
- PEÑUELAS, J. i FILELLA, I. (2001). Phenology: Responses to a warming world. *Science*, 294: 793-795.
- PEÑUELAS, J. i LLUSIÀ, J. (2003). BVOCs: Plant defense against climate warming? *Trends in Plant Science*, 8: 105-109.
- Peñuelas, J., Filella, I. i Comas, P. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952-2000. *Global Change Biology*, 8: 531-544.



STEFANESCU, C., PEÑUELAS J. i FILELLA, I. (2003)  
Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology*, 9: 1494-1406.

Aquest article es basa en l'informe que els autors varen elaborar sobre els sistemes naturals: Ecosistemes terrestres. a: J.E. Llebot ed., Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Institut Estudis Catalans, Barcelona, 2005.

